

VARIÁVEIS-CHAVE NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE MISTURAS SOLO-CIMENTO

Key-parameters for the strength control of soil-cement mixtures

Diego Foppa*

Lucas Festugato**

Nilo Cesar Consoli***

Karla Salvagni Heineck****

Antônio Viana da Fonseca*****

RESUMO – Frequentemente, a utilização de técnicas tradicionais da engenharia geotécnica depara-se com obstáculos de caráter econômico e ambiental. A técnica do solo-cimento torna-se atrativa quando o melhoramento das propriedades do solo do local constitui-se numa alternativa de projeto. A técnica de tratamento de solos com cimento encontra aplicação, por exemplo, na construção de bases para plataformas rodó e ferroviárias, na proteção de taludes em barragens de terra e como camada de suporte para fundações superficiais. Entretanto, ainda não existem metodologias racionais de dosagem e projeto das misturas de solo-cimento baseadas em critérios racionais como existe, por exemplo, para o concreto, onde a relação água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Nesse sentido, este estudo objetiva quantificar a influência da quantidade de cimento, da porosidade e do teor de umidade de moldagem, sobre a resistência mecânica de misturas solo-cimento e avaliar a adequação do uso das relações água/cimento e vazios/cimento na estimativa da sua resistência à compressão simples. Para isso foram realizados ensaios de compressão simples e medidas de sucção matricial. Os resultados mostram que a resistência à compressão simples cresceu linearmente com o aumento da quantidade de cimento e exponencialmente com a redução na porosidade da mistura compactada. Além disso, a variação do teor de umidade de moldagem afetou significativamente a resistência à compressão simples em misturas compactadas num mesmo peso específico aparente seco. Verificou-se que, para o solo-cimento no estado não-saturado (estado em que normalmente se encontram os aterros compactados), a relação água/cimento não é um bom parâmetro para estimativa da resistência à compressão simples. Ao contrário, a relação vazios/cimento, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cimento, ajustado por um expoente, demonstrou ser o parâmetro mais adequado na estimativa da resistência à compressão simples do solo-cimento estudado.

ABSTRACT – Often, the use of traditional techniques in geotechnical engineering faces obstacles of economical and environmental nature. The soil-cement technique becomes attractive when the improvement of the local soil is a project alternative. The treatment of soils with cement finds application, for instance, in the construction of pavement and railroad base layers, in slope protection of earth dams and as a support layer for shallow foundations. However, there is no dosage methodologies based on a rational criteria, as it exists in the case of the concrete technology, where the water/cement ratio plays a fundamental role in the assessment of the target strength. In that sense, this study aims to quantify the influence of the amount of cement, the porosity and the moisture content on

* Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

** Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

*** Professor, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: consoli@ufrgs.br

**** Professora, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

***** Professor, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. E-mail: viana@fe.up.pt

the strength of a sandy soil artificially cemented, as well as to evaluate the use of a water/cement ratio and a voids/cement ratio to assess its unconfined compression strength. A number of unconfined compression tests and measures of matric suction were carried out. The results show that the unconfined compression strength increased linearly with the increase of the amount of cement and exponentially with the reduction in the porosity of the compacted mixture. Besides, the change in moisture content has remarkably affected the unconfined compression strength of mixtures compacted in a same dry density. It was verified that, for the soil-cement in the unsaturated state (state usually met by compacted fills), the water/cement ratio is not a good parameter for assessment of unconfined compression strength. In the other hand, the voids/cement ratio, defined by the reason between the porosity of the compacted mixture and the volumetric cement content, adjusted by an exponent, demonstrated to be the most appropriate parameter in the assessment of unconfined compression strenght of the studied soil-cement.

PALAVRAS CHAVE – Misturas solo-cimento, relação água/cimento, relação vazios/cimento, ensaios de compressão simples.

1 – INTRODUÇÃO

A utilização de técnicas tradicionais da engenharia geotécnica, muitas vezes, esbarra em dificuldades impostas por custos elevados ou por limitações de caráter ambiental. A utilização de bases granulares para rodovias ou ferrovias, por exemplo, torna-se inviável quando a jazida está muito distante do local da obra, pelos elevados custos e danos ambientais associados. Outro exemplo é a execução de fundações em terrenos de baixa capacidade de suporte, onde a utilização de fundações profundas e os custos associados a essa solução podem tornar-se incompatíveis com a dimensão do empreendimento, como no caso de conjuntos habitacionais de baixo custo.

Nesses casos, uma alternativa disponível é o melhoramento das propriedades do solo do local através da adição de cimento Portland. A técnica de tratamento de solos com cimento vem sendo empregada com sucesso, por exemplo, na construção de bases para pavimentos, na proteção de taludes em barragens de terra e canais, para execução de camadas de apoio para fundações superficiais, para contenção em escavações, na prevenção de liquefação em areias (Ingles e Metcalf, 1972; Dupas e Pecker, 1979; Thomé *et al.*, 2005).

Entretanto, apesar das diversas aplicações, ainda não existem metodologias de dosagem das misturas de solo-cimento baseadas em critérios mais racionais como existe, por exemplo, para o concreto, onde a relação água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada. Atualmente o procedimento de dosagem do solo-cimento é feito através de uma bateria de ensaios laboratoriais que buscam obter o teor mínimo de cimento que se deve adicionar para a obtenção das propriedades (resistência e durabilidade) requeridas. Uma possível explicação para tal fato é que solos cimentados exibem um comportamento mecânico complexo, influenciado por diversos fatores, dentre os quais destacam-se as propriedades físico-químicas do solo, o tipo e quantidade de agente cimentante, a porosidade e o teor de umidade na qual a mistura é compactada. (Clough *et al.*, 1981; Rotta *et al.*, 2003, Consoli *et al.*, 2000, 2001, 2003, 2006).

Nesse sentido, este estudo tem por objetivo quantificar a influência do teor de cimento, da porosidade da mistura compactada e do teor de umidade de moldagem sobre a resistência de misturas solo-cimento e verificar a validade do uso das relações água/cimento e vazios/cimento na estimativa da sua resistência à compressão simples.

O presente estudo, ao identificar e quantificar as variáveis mais importantes no controle da resistência de misturas solo-cimento, fornecerá subsídios para que, a partir da manipulação adequada de tais variáveis por meio da dosagem, se possa atingir de forma objetiva e com maior confiabilidade as propriedades requeridas.

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental, em síntese, foi dividido e executado em duas etapas. Na primeira, foram realizados os ensaios de caracterização física do solo e do cimento utilizados. A segunda, consistiu na realização de uma bateria de ensaios de compressão simples sobre os pontos de moldagem pré-estabelecidos de acordo com o programa de ensaios detalhado no item 2.3. Além disso, foram feitas medidas de sucção matricial em amostras de interesse.

2.1 – Materiais

Foi utilizado um solo residual de arenito da denominada Formação Botucatu. A jazida de onde foi coletada a amostra, situa-se às margens da rodovia estadual RS-240, na região metropolitana de Porto Alegre, Brasil. A amostra foi coletada remexida, mediante escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. O solo assim amostrado foi armazenado e transportado em tonéis plásticos adequadamente vedados. Durante a coleta, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar sua contaminação.

O solo residual de arenito Botucatu pode ser classificado como uma areia fina siltosa, não uniforme (NBR 6502/95 – ABNT, 1995). As frações e curva granulométrica, bem como os demais resultados obtidos dos ensaios de caracterização, estão sumarizados na Tabela 1 e na Figura 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas da amostra de solo.

PROPRIEDADES	VALORES
Limite de Liquidez	23%
Limite de Plasticidade	13%
Índice de Plasticidade	10%
Densidade Real dos Grãos	2,64
% de Areia Média ($0,2 < \phi < 0,6$ mm)	16,2%
% de Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2$ mm)	45,4%
% de Silte ($0,002 < \phi < 0,06$ mm)	33,4%
% de Argila ($\phi < 0,002$ mm)	5,0%
Diâmetro Efetivo (D_{10})	0,0032 mm
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	50

Os resultados dos ensaios de compactação da amostra utilizada estão plotados na Figura 2. Pode-se observar as curvas de compactação obtidas para as energias normal, intermediária e modificada do ensaio de Proctor, bem como as curvas de 100% e 89% de saturação.

O material cimentante utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial. Este material foi escolhido devido ao seu acelerado ganho de resistência, atingindo aos 7 dias de idade cerca de 80% da resistência obtida aos 28 dias. Essa característica permitiu que o tempo de cura adotado para a execução dos ensaios compressivos fosse de 7 dias. A densidade real dos grãos de cimento é de 3,15.

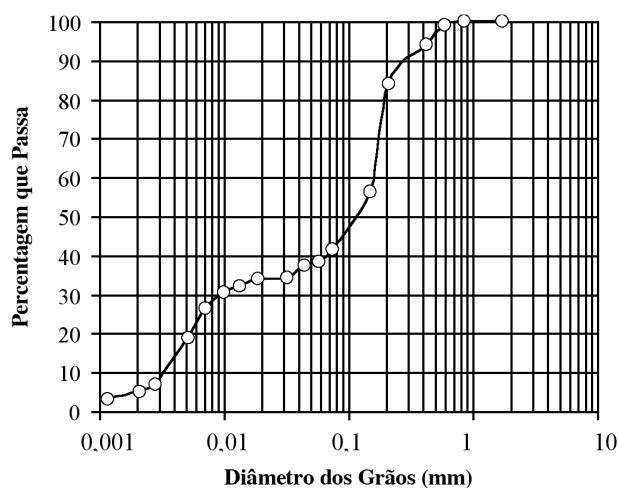


Fig. 1 – Curva granulométrica da amostra de solo.

A água utilizada para a moldagem dos corpos-de-prova foi a potável proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada quando especificada pela respectiva norma.

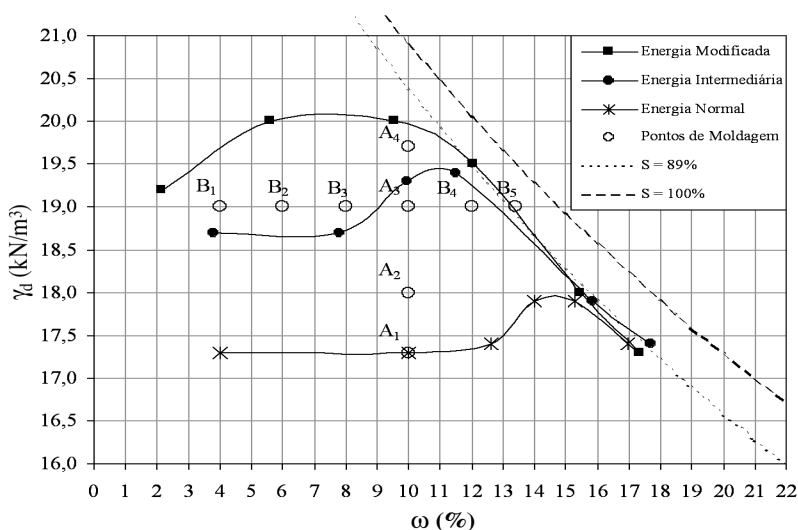


Fig. 2 – Curva de compactação do solo residual de arenito e programa de ensaios de compressão simples.

2.2 – Métodos

2.2.1 – Moldagem e Cura dos Corpos-de-Prova

Foram utilizados, para os ensaios de compressão simples, corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A confecção dos corpos-de-prova foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura.

Após a pesagem dos materiais (solo, cimento e água), o solo e o cimento eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. Em seguida, era adicionada a água continuando o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida. A quantidade de cimento necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco e a quantidade de água (teor de umidade) em relação à soma das massas de solo seco e de cimento. A quantidade total de mistura permitia a moldagem de um corpo-de-prova e uma quantidade adicional para determinação do teor de umidade.

Depois de misturados os materiais, a quantidade de solo-cimento necessária para confecção de um corpo-de-prova era dividida em três partes iguais, armazenadas em recipientes com tampa para evitar a perda de umidade, para posterior compactação. Após esse processo, duas pequenas porções da mistura eram retiradas e colocadas em cápsulas para determinação do teor de umidade. A média dos dois teores de umidade medidos era adotada como sendo o teor de umidade de corpo-de-prova. A amostra era, então, compactada estaticamente em três camadas no interior de um molde de PVC bipartido, devidamente lubrificado, de maneira que cada camada atingisse as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco, tomando-se o cuidado de escarificar levemente os topos acabados da primeira e da segunda camada para aumentar a integração entre as camadas superpostas. Concluído o processo de moldagem, o corpo-de-prova era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados com resolução de 0,01g e 0,1mm respectivamente, e acondicionado em um saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor de umidade.

Os corpos de prova assim obtidos eram, então, armazenados e curados por um período de seis dias em um ambiente com temperatura e umidade controladas ($23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar maior que 95%). Foram considerados aptos para ensaios os corpos-de-prova que atendiam as seguintes tolerâncias:

- *Peso específico aparente seco* (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%, sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efetivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta.
- *Teor de umidade* (ω): valor especificado $\pm 0,5$ pontos percentuais.
- *Dimensões*: diâmetro $50 \pm 0,5\text{mm}$ e altura $100 \pm 1\text{mm}$.

2.2.2 – Ensaios de Compressão Simples

Ensaios de compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade da estabilização com cimento ou acessar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de misturas solo-cimento. Uma das razões para tal é a experiência acumulada com este tipo de ensaio na área de concretos, além de ser um ensaio de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico. Porém, sabe-se que, quando da utilização do solo-cimento como uma camada compactada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, a ruptura do sistema geralmente ocorre por tração na base da camada estabilizada. Pareceria mais razoável, então, utilizar o ensaio de resistência à tração como uma medida direta da resistência do solo-cimento. Entretanto diversos trabalhos demonstram que, em geral, a resistência à tração de solos-cimentados varia entre 9% e 14% da resistência à compressão simples (Ingles e Metcalf, 1972; Clough *et al.*, 1981; Dass *et al.*, 1994; Consoli *et al.*, 2001). Esse fato, aliado aos aspectos mencionados anteriormente, fez com que o ensaio de compressão simples fosse adotado para a medição da influência das variáveis investigadas.

Para os ensaios de compressão simples foi utilizada uma prensa automática com capacidade máxima de 50kN, além de anéis dinamométricos calibrados com capacidade de 10kN e 50kN e resoluções de 0,005kN e 0,023kN respectivamente. A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14mm por minuto.

Os corpos-de-prova, após serem curados por 6 dias na câmara úmida, eram submersos em um tanque com água por um período de 24 horas, visando aproximar a condição de saturação e minimizar a sucção. A temperatura da água do tanque era controlada e mantida em $23 \pm 3^\circ\text{C}$. Imediatamente antes do ensaio de compressão simples, os corpos-de-prova eram retirados do tanque e superficialmente secos com auxílio de um tecido absorvente. Procedia-se então a execução do ensaio e anotava-se a carga máxima atingida pelo corpo-de-prova. Como critério de aceitação para o ensaio de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências individuais de três corpos-de-prova, considerados idênticos, não deveriam se afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

2.2.3 – Medidas de Sucção Matricial

Como todos os corpos-de-prova do programa de ensaios (detalhado no item 2.3), no teor de umidade de moldagem, encontram-se na condição não-saturada, um determinado nível de sucção estará presente. As medidas de sucção neste trabalho tem o objetivo de verificar qual sua magnitude e se esta apresenta variação significativa entre os corpos-de-prova.

A sucção medida foi a matricial, ou seja, a proveniente das forças capilares existentes no interior da amostra. Utilizou-se para medição a técnica do papel filtro (Marinho, 1995). O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso, com deficiência de umidade, é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção. Tendo-se a relação entre sucção e umidade do papel filtro (curva de calibração) pode-se obter a sucção do solo a partir da curva de calibração. Esta técnica foi escolhida por ser uma técnica simples e de baixo custo. Ela fornece resultados plenamente satisfatórios desde que se tenha extremo cuidado nos procedimentos utilizados.

O papel filtro utilizado foi o Whatman N° 42. Sua umidade inicial, no estado seco ao ar, é de aproximadamente 6%, isto permite medições de sucção de zero a 29MPa. As equações de calibração do papel filtro Whatman N° 42 utilizadas são as apresentadas por Chandler *et al.* (1992) e recomendadas por Marinho (1995):

- Para umidades do papel filtro (w) $> 47\%$, Sucção (kPa) = $10 (6,05 - 2,48 \log w)$
- Para umidades do papel filtro (w) $\leq 47\%$, Sucção (kPa) = $10 (4,84 - 0,0622 w)$

2.3 – Programa de Ensaios de Compressão Simples

O programa de ensaios de compressão simples constituiu a principal etapa desta pesquisa e foi elaborado de maneira que pudesse ser avaliada, isoladamente, a influência do teor de cimento, da porosidade, do teor de umidade de moldagem, da relação água/cimento e da relação vazios/cimento sobre a resistência mecânica de misturas solo-cimento.

O programa de ensaios de compressão simples é apresentado na Figura 2. Pode-se observar as curvas de compactação do solo (sem a adição de cimento) para as energias usuais do ensaio de Proctor (normal, intermediária e modificada), as curvas de saturação de 89% e 100% e a localização dos pontos de moldagem dos corpos-de-prova.

Os pontos de moldagem foram posicionados em duas linhas. Uma linha vertical (pontos A1, A2, A3 e A4), denominada linha “A”, com um mesmo teor de umidade e diferentes pesos específicos aparentes secos. E uma linha horizontal, denominada linha “B” (pontos B1, B2, B3, A3, B4 e B5), com mesmo peso específico aparente seco e diferentes teores de umidade. A Tabela 2 apresenta os pares peso específico aparente seco e teor de umidade para todos os pontos do programa de ensaios.

Tabela 2 – Pontos de moldagem.

PONTOS DE MOLDAGEM		
PONTO	γ_d (kN/m ³)	ω (%)
A ₁	17,3	10,0
A ₂	18,0	10,0
A ₃	19,0	10,0
A ₄	19,7	10,0
B ₁	19,0	4,0
B ₂	19,0	6,0
B ₃	19,0	8,0
B ₄	19,0	12,0
B ₅	19,0	13,4

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo que ficassem compreendidos dentro de uma faixa de pesos específicos aparentes secos e teores de umidade exequíveis numa situação de campo. Cada ponto da linha “A” foi moldado com 5 diferentes porcentagens de cimento (C): 1%, 2%, 3%, 5% e 7%. Já os pontos da linha “B” foram moldados com três porcentagens diferentes de cimento: 2%, 9% e 12%. Tais porcentagens foram escolhidas a partir da experiência brasileira e internacional com o solo-cimento, tanto em nível experimental quanto em aplicações diversas como, por exemplo, em rodovias ou para proteção de barragens. Em função da dispersão característica dos ensaios de compressão simples, cada corpo-de-prova foi moldado em triplicata, obtendo-se assim, uma maior confiabilidade nos resultados.

3 – RESULTADOS

3.1 – Efeito do Teor de Cimento, da Porosidade e do Teor de Umidade de Moldagem

A partir dos pontos de moldagem da linha “A” ($\omega = 10\%$) do programa de ensaios, são apresentadas as Figuras 3 e 4. Na Figura 3 são mostradas as curvas de ajuste da variação da resistência à compressão simples em função do teor de cimento (C). Observa-se que o teor de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para gerar significativos ganhos de resistência. Pode-se considerar que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento do teor de cimento. Este tipo de comportamento tem sido reportado em vários outros trabalhos com faixa de teores semelhantes à aqui utilizada. (Ingles e Metcalf, 1972; Núñez, 1991; Schnaid *et al.*, 2001).

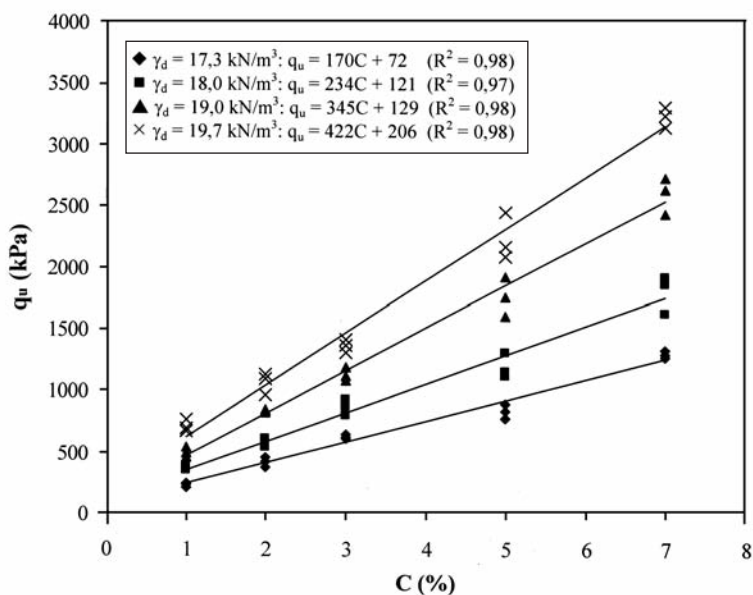


Fig. 3 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento.

Outro aspecto observado na Figura 3 é que a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, cresce com o aumento do peso específico aparente seco do solo-cimento compactado. Esse fato indica que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas.

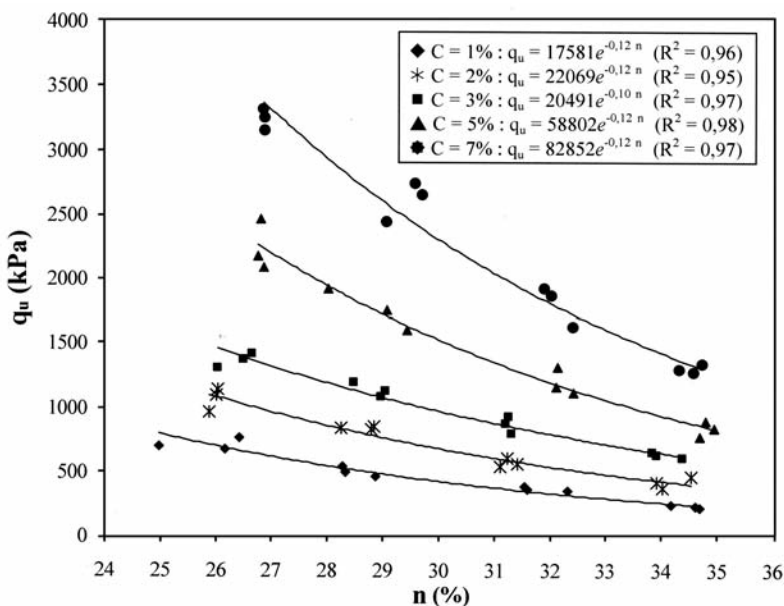


Fig. 4 – Variação da resistência à compressão simples em relação à porosidade do solo-cimento.

Clough *et al.* (1981), ao estudar areias naturalmente e artificialmente cimentadas, também relata que o aumento do peso específico aparente seco da areia aumentou a efetividade da cimentação. Da mesma forma, Núñez (1991) também observou este fenômeno, tanto para misturas de solo-cal quanto para misturas de solo-cimento.

Huang e Airey (1993) verificaram, através de fotomicrografias, que em pesos específicos mais altos existem muito mais contatos entre os produtos da hidratação do cimento e as partículas da areia ensaiada. Além disso, o cimento preenche muitos vazios existentes entre as partículas de areia de maior dimensão. Esse mesmo aspecto foi comprovado por Chang e Woods (1992) através de microscopia eletrônica sobre diferentes areias ensaiadas com diferentes tipos e teores de agentes cimentantes. A existência de um número maior de contatos e, conseqüentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contatos, explica o aumento na taxa de ganho de resistência com a redução da porosidade do material compactado.

Através da Figura 4 pode-se observar como a porosidade afetou a resistência à compressão simples do solo-cimento ensaiado. Independentemente do teor de cimento, a redução na porosidade do material promoveu ganhos significativos de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

O efeito benéfico, em termos de aumento de resistência com a diminuição da porosidade, tem sido reportado em diversos trabalhos (Ingles e Metcalf, 1972; Clough *et al.*, 1981; Núñez, 1991; Ismail *et al.*, 2002; Consoli *et al.*, 2006). O mecanismo pelo qual a redução na porosidade influencia o aumento na resistência do solo-cimento parece estar relacionado com um aspecto principal, já ressaltado anteriormente: a existência de um maior número de contatos e maior intertravamento entre partículas do solo. Com a maior proximidade e a existência de um maior número de contatos entre as partículas do solo, os produtos da hidratação do cimento têm melhores condições para promover ligações efetivas entre as mesmas. Um segundo aspecto, também resultado do maior número de contatos entre as partículas, é o maior atrito que pode ser mobilizado em reação às tensões aplicadas, bem como a existência de um maior intertravamento ou imbricamento.

Na Figura 5 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função do teor de umidade de moldagem para os corpos-de-prova de mesmo peso específico aparente seco (linha “B”). Observa-se que a variação no teor de umidade de moldagem afetou a resistência à compressão simples. De maneira geral, observa-se um aumento da resistência com o teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual ocorre um decréscimo na resistência. Verifica-se que o teor ótimo de umidade é de aproximadamente 11,5% independentemente da quantidade de cimento utilizada.

A explicação para tal fato está, provavelmente, relacionada à estrutura conferida ao solo-cimento no momento da moldagem, sendo que a quantidade de água presente na mistura tem papel fundamental na configuração dessa estrutura. O termo estrutura está associado ao arranjo espacial das partículas do solo e à existência de forças de ligação entre as mesmas (por exemplo, cimentação). De acordo com Mitchell (1976), existe um grande número de maneiras pelas quais as partículas de solo podem se organizar espacialmente, principalmente quando partículas de diferentes tamanhos, formas e naturezas (areias, siltes e argilas) estão presentes. De maneira geral, em solos predominantemente argilosos, podem ser observadas estruturas denominadas dispersas ou estruturas floculadas. Já em solos arenosos e siltosos pode-se observar um arranjo granular com maior ou menor grau de compacidade. O solo aqui utilizado possui uma fração fina (silte + argila) de aproximadamente 38,4% do peso de material seco. De maneira geral, ele apresenta os grãos de areia recobertos por partículas de silte e argila.

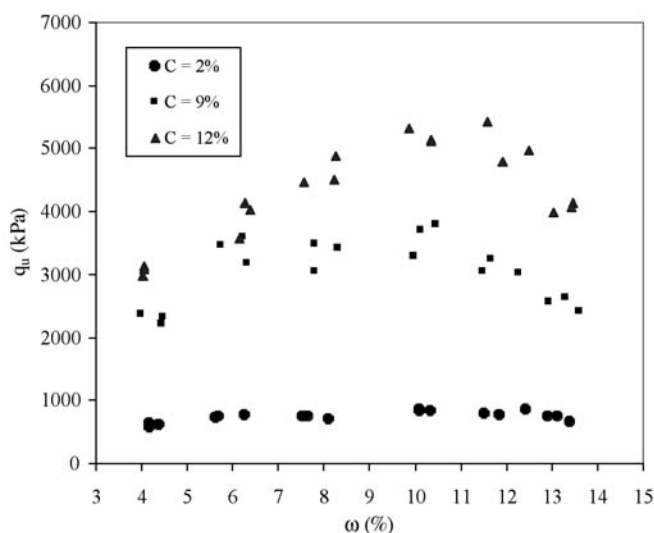


Fig. 5 – Efeito do teor de umidade de moldagem sobre a resistência do solo-cimento.

Entende-se que a variação no teor de umidade de moldagem do solo-cimento ensaiado gerou estruturas diferenciadas, que afetaram os valores obtidos na resistência à compressão simples. A compactação em teores de umidade abaixo de 11,5% apresentou, possivelmente, uma estrutura mais floclada que para teores acima desse valor, onde as partículas apresentaram um maior grau de orientação. É interessante notar também que o efeito do teor de umidade sobre a resistência foi mais pronunciado para os teores de cimento iguais a 9% e 12%. Esse fato pode estar associado ao aumento do teor de finos devido à inserção do cimento, já que o mesmo apresenta uma granulometria fina, com partículas de diâmetro menor que 0,0075mm. Esse acréscimo no teor de finos pode ter tornado o material mais sensível, em termos de variação no tipo de estrutura, às variações no teor de umidade de moldagem.

O processo de imersão dos corpos-de-prova por 24 horas antes da realização do ensaio de compressão simples se mostrou satisfatório no aumento e uniformização do grau de saturação das amostras que ficou em torno de 87%, independentemente da porosidade inicial ou do teor de cimento utilizado. Os baixos valores de sucção medidos (<100 kPa) permitiram desconsiderar a sucção como mais uma variável nas análises das variáveis investigadas.

3.2 – Efeito da Relação Água/Cimento

A partir dos dados plotados na Figura 5, referentes aos teores de 2% e 9% de cimento, foi elaborada a Figura 6 onde é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação água/cimento (definida pela massa de água dividido pela massa de cimento). Verifica-se que não é possível estabelecer uma relação entre esses dois fatores, uma vez que os dados apresentaram-se em “patamares” de resistência diferenciados em função do teor de cimento utilizado.

Esse resultado difere dos obtidos por Horpibulsuk *et al.* (2003) e Azambuja (2004) que apontam a relação água/cimento como um bom parâmetro para a análise do desenvolvimento da resistência dos materiais estudados pelos referidos autores. Entretanto deve-se notar que, nos dois estudos anteriormente citados, os altos teores de umidade utilizados, eram suficientes para preencher

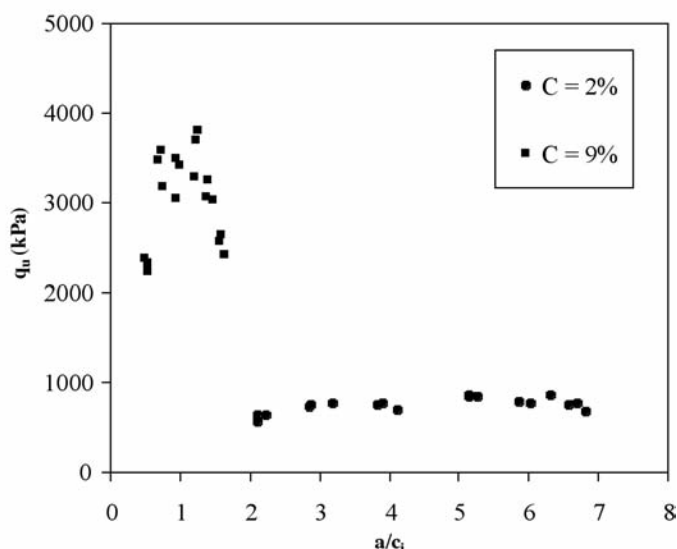


Fig. 6 – Variação da resistência à compressão simples em função de relação água/cimento.

todos os poros da amostra, refletindo indiretamente a quantidade de vazios existente. Isso é o mesmo que ocorre no caso do concreto, onde a quantidade de água reflete a quantidade de vazios existente na pasta de cimento que recobre os agregados.

No presente estudo, os vazios estão apenas parcialmente preenchidos pela água, não existindo relação entre a quantidade de vazios e a quantidade de água. Portanto, o papel desempenhado pelos vazios e pela quantidade de água são diferentes. Enquanto que água afeta a resistência do material por alterar sua estrutura, a porosidade afeta diretamente a resistência por alterar o número de pontos de contatos entre as partículas e por consequência a magnitude da cimentação e a distribuição de tensões na amostra. Logo, para o solo-cimento no estado não-saturado (estado em que normalmente se encontram os aterros compactados), uma relação entre quantidade de vazios e quantidade de cimento deve ser a mais adequada na análise e controle da sua resistência mecânica.

3.3 – Efeito da Relação Vazios/Cimento

Na Figura 7 é apresentada a variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cimento definida pela equação 1:

$$\frac{V_v}{V_{ci}} = \frac{\text{Volume absoluto de vazios (água + ar)}}{\text{Volume absoluto de cimento}} \quad (1)$$

Todos os corpos-de-prova apresentados na Figura 7 possuem o mesmo teor de umidade (linha “A”, $\omega=10\%$) porém, teores de cimento e porosidades variadas. Pode-se observar uma razoável correlação entre a relação proposta e a resistência à compressão simples do solo-cimento compactado em estudo. Contudo, verifica-se na Figura 7, que a dispersão dos pontos em torno da curva de ajuste foi maior do que a obtida quando considerados os efeitos isolados da quantidade de cimento ou porosidade da mistura (ver Figuras 3 e 4). Na Figura 7 também pode ser verificado claramente que pontos com mesma relação vazios/cimento, obtidos de modos diferentes (uma por densificação

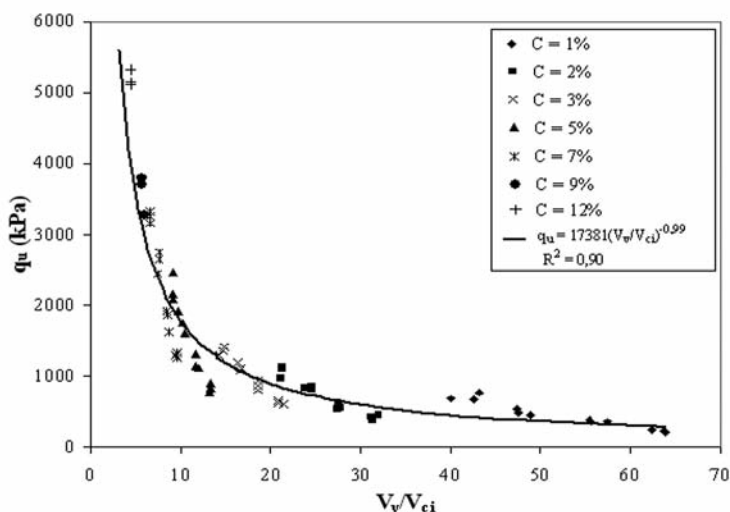


Fig. 7 – Variação da resistência à compressão simples em função da relação vazios/cimento – pontos diferenciados pelo seu teor de cimento.

e outra por aumento do teor de cimento), apresentam resistências distintas, sendo que os pontos com menor porosidade e menor quantidade de cimento atingem, sistematicamente, resistências maiores.

O que ocorre é que a relação vazios/cimento definida pela equação 1 assume que dada uma variação no volume de vazios, uma variação proporcional no volume de cimento seria suficiente para contrabalançar a perda ou ganho na resistência. Em termos matemáticos (equações 2, 3 e 4):

$$\text{Se: } \frac{V_v}{V_{ci}} = K \quad (2) \quad \text{e: } \frac{V_v + \Delta V_v}{V_{ci} + \Delta V_{ci}} = K \quad (3) \quad \text{então: } \Delta V_{ci} = \frac{V_{ci}}{V_v} \Delta V_v \quad (4)$$

Onde: ΔV_v = variação no volume de vazios.

ΔV_{ci} = variação no volume de cimento.

K = Constante.

Observando-se as Figuras 8 e 9, nota-se que as taxas de variação da resistência à compressão simples em relação às grandezas volume de vazios (V_v) e inverso do volume de cimento ($1/V_{ci}$) são substancialmente diferentes. Uma maneira de compatibilizar as taxas de variação das grandezas V_v e $1/V_{ci}$ é através da aplicação de uma potência sobre uma delas. Após diversas tentativas obteve-se que, aplicando uma potência igual a 0,28 sobre o parâmetro V_{ci} , haveria uma melhor compatibilização entres as taxas de variação, resultando num melhor ajuste para a relação vazios/cimento como mostra a Figura 10. Nela, percebe-se que a resistência à compressão simples do material em estudo pode ser avaliada, com um excelente grau de precisão, através da relação vazios/cimento ajustada pelo expoente 0,28.

Entretanto, uma forma mais tangível de expressar a relação vazios/cimento pode ser feita utilizando, em alternativa ao volume de vazios, a porosidade do material (n), expressa em porcentagem do volume total e, em vez do volume de cimento, o teor volumétrico de cimento, também expresso em porcentagem do volume total (C_{iv}). A Figura 11 apresenta o novo ajuste utilizando essa relação $[n/(C_{iv})^{0,28}]$. Percebe-se que não ocorre alteração na qualidade do ajuste dos dados, uma vez que as novas variáveis são proporcionais às utilizadas anteriormente.

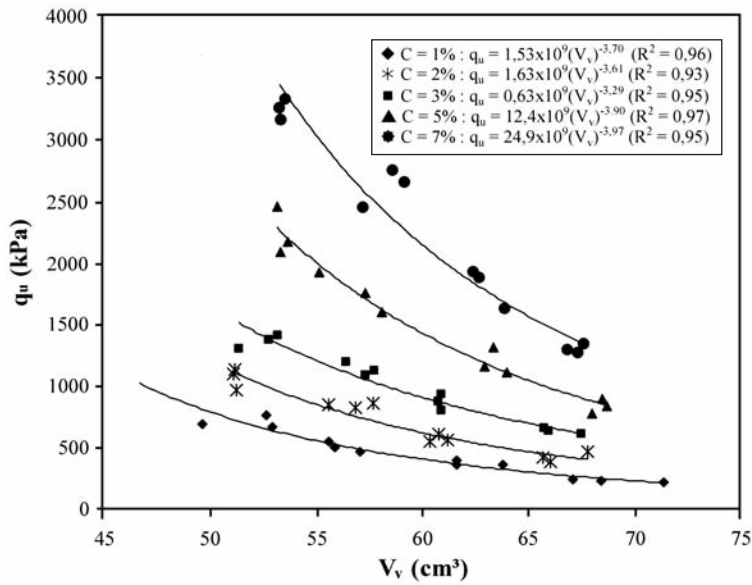


Fig. 8 – Relação entre o volume de vazios e a resistência à compressão simples.

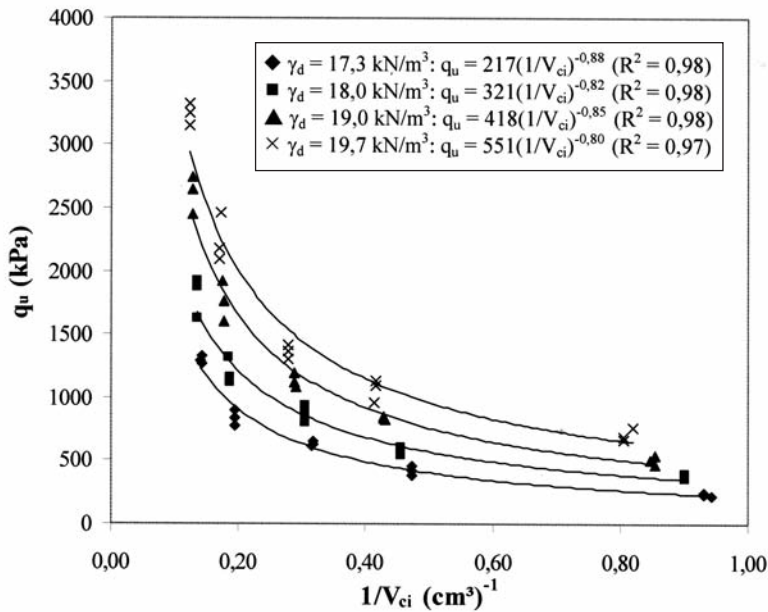


Fig. 9 – Relação entre o inverso do volume de cimento e a resistência à compressão simples.

Cabe ressaltar que todos dados plotados nos gráficos das Figuras 3, 4 e 7 até 11 continham o mesmo teor de umidade de moldagem ($\omega = 10\%$). Como foi visto na Figura 5, a variação do teor de umidade (combinado possivelmente com a inserção de finos - cimento) possui uma influência significativa sobre a resistência à compressão simples do material estudado. Através da Figura 12, onde são apresentados os pontos da linha “B”, percebe-se que para uma mesma relação vazios/ci-

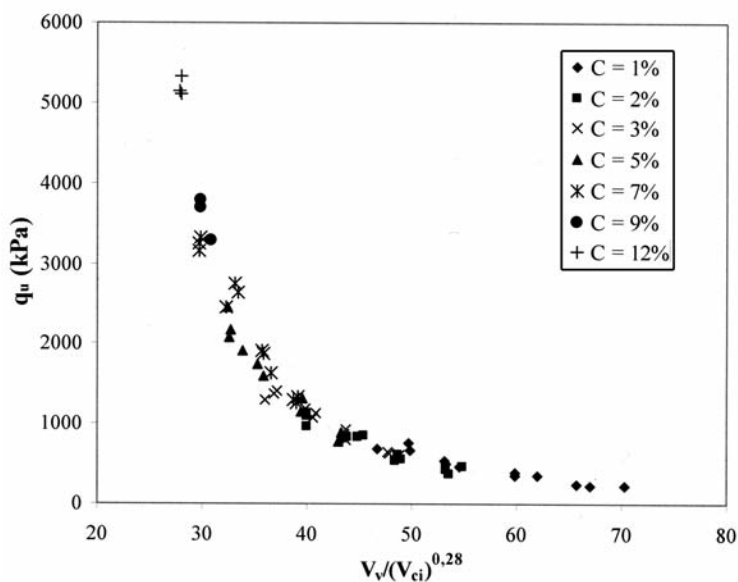


Fig. 10 – Relação vazios/cimento ajustada.

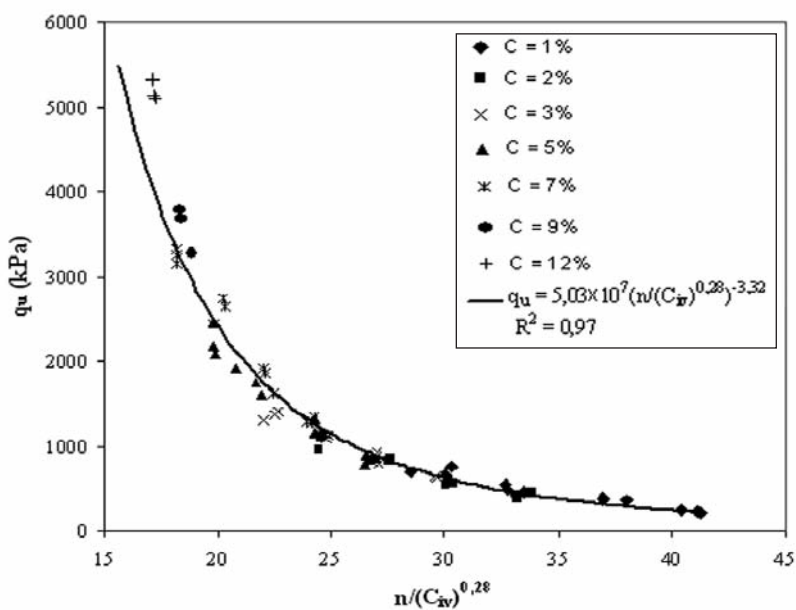


Fig. 11 – Relação vazios/cimento expressa em termos da porosidade e do teor volumétrico de cimento.

mento as resistências obtidas foram diferentes, especialmente para os teores de 9% e 12% de cimento. Por isso, em primeira instância, a relação vazios/cimento estabelecida é válida apenas quando consideramos o teor de umidade de moldagem constante.

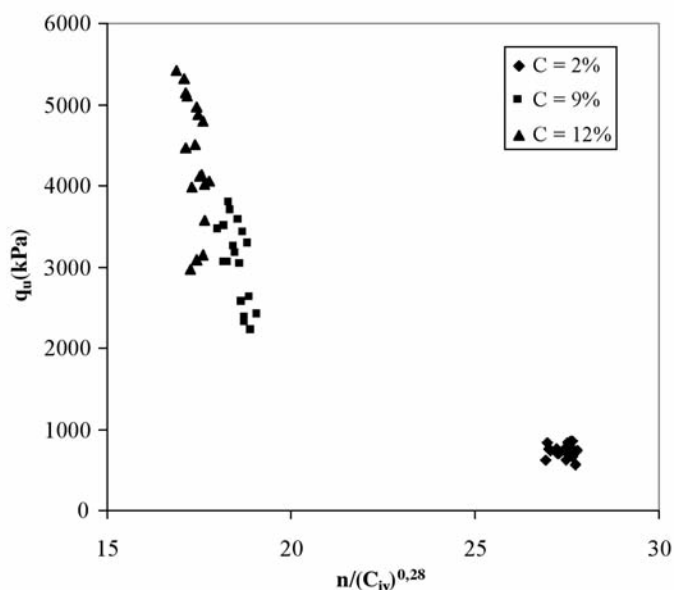


Fig. 12 – Efeito da variação do teor de umidade de moldagem para corpos-de-prova com mesmo fator vazios/cimento

Os resultados apresentados neste trabalho sugerem que o projetista, ou o engenheiro responsável pelo controle de qualidade, pode selecionar, ou adaptar perante os resultados de aplicação em obra, com explícita fundamentação, dentro do binário quantidade de cimento e energia de compactação, uma mistura que atenda à resistência requerida em projeto ao menor custo possível. De facto, esta relação apresenta grande utilidade no controle da execução de camadas tratadas com cimento, na medida em que, constatada uma compactação inferior ao prescrito, pode-se estimar com confiabilidade, através da curva da resistência à compressão simples versus relação vazios/cimento, a perda de resistência decorrente deste fato e, conseqüentemente, adotar medidas corretivas como, por exemplo, o reforço da camada tratada, ou ainda, a redução do carregamento a ser transmitido.

4 – CONCLUSÕES

A partir da análise e discussão dos resultados, bem como da avaliação da influência das variáveis investigadas (teor de cimento, porosidade, teor de umidade de moldagem, relação água/cimento e relação vazios/cimento) sobre a resistência mecânica das misturas solo-cimento foram estabelecidas, dentro das condições e limites específicos deste estudo, as seguintes conclusões:

- A adição de cimento, mesmo em pequenas quantidades, promove ganhos significativos de resistência no material. Na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples cresceu linearmente com o aumento do teor de cimento. Além disso, a taxa de ganho de resistência, representada pela inclinação das retas de ajuste, cresceu com o aumento do peso específico aparente seco do solo-cimento compactado, indicando que a efetividade da cimentação é maior nas misturas mais compactas.
- A redução na porosidade do material compactado promove ganhos significativos de resistência. Verificou-se que a resistência à compressão simples aumentou exponencialmente com a redução da porosidade da mistura compactada.

- A variação do teor de umidade de moldagem, mantendo-se constante o peso específico aparente seco, afetou a resistência à compressão simples do solo-cimento. De maneira geral, ocorreu um aumento da resistência com o teor de umidade até um valor ótimo, a partir do qual a resistência passa a diminuir. Parece existir, associada ao efeito do teor de umidade, a influência do acréscimo de finos pelo aumento no teor de cimento.
- Verificou-se que não existe uma relação facilmente equacionável entre a resistência à compressão simples e a relação água/cimento para o material estudado.
- A relação vazios/cimento, definida pela razão entre a porosidade da mistura compactada e o teor volumétrico de cimento, ajustado por um expoente $[n/(C_{iv})^{0,28}]$, mostrou-se adequada para a avaliação da resistência à compressão simples do solo estudado. Acredita-se que este expoente é uma função do tipo de material utilizado (solo e cimento);
- A relação vazios/cimento apresenta grande utilidade no projecto e controle da execução de camadas de solos tratadas com cimento.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PRONEX-FAPERGS (Processo nº 04/0841.0), ao CNPq (projetos Produtividade em Pesquisa nº 3008032/2004-4 e Edital Universal 2004 nº 472643/2004-5) e ao Projeto ProDoc/Capes pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). *Rochas e solos – Terminologia: NBR 6502*. Rio de Janeiro, Brasil, 18 p.
- Azambuja, R. M. B. (2004). *Comportamento Mecânico e Hidráulico de Misturas de Solo-Cimento-Bentonita para Aplicação em Barreiras Verticais de Contenção de Contaminantes*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 98 p.
- Chandler, R. J., Crilly, M. S.; Montgomery-Smith, G. (1992). A Low-cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-rise Buildings. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Civil Engineering*, London, v. 92, n. 2, p. 82-89.
- Chang, T. S.; Woods, R. D. (1992). *Effect of Particle Contact Bond on Shear Modulus*. Journal of Geotechnical Engineering, New York: ASCE, v. 118, n. 8, p. 1216-1233.
- Clough, G. W.; Sitar, N.; Bachus, R. C.; Rad, N. S. (1981). *Cemented Sands under Static Loading*. Journal of Geotechnical Engineering Division, New York: ASCE, v. 107, n. 6, p. 799-817.
- Consoli, N.C., Rotta, G.V.; Prietto, P.D.M. (2000). *The influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils*. Géotechnique, v. 50, n. 1, p. 99-105.
- Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Carraro, J.A.H.; Heineck K.S. (2001). *Behavior of Compacted Soil-Fly Ash-Carbide Lime-Fly Ash Mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE v. 127, n. 9, p. 774-782.
- Consoli, N. C.; Vendruscolo, M. A.; Prietto, P. D. M. (2003). *Behavior of Plate load tests on soil layers improved with cement and fiber*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 129, n. 1, p. 96-101.

- Consoli, N. C.; Rotta, G. V.; Prietto, P. D. M. (2006). *Yielding-Compressibility-Strength Relationship for an Artificially Cemented Soil Cured Under Stress*. *Géotechnique*, v. 56, n. 1, p. 69-72.
- Dass, R. N.; Yen, S. C.; Dass, B. M.; Puri, V. K.; Wrigth, M. A. (1994). *Tensile Stress-Strain Characteristics of Lightly Cemented Sand*. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, v. 17, n. 3, p. 305-314.
- Dupas, J. M.; Pecker, A. (1979). *Static and Dynamic Properties of Sand-Cement*. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v. 105, n. 3, p. 419-436.
- Horpibulsuk, S; Miura, N; Nagaraj, T. S. (2003). *Assessment of Strength Development in Cement-Admixed High Water Content Clays with Abram's Law as a Basis*. *Géotechnique*, v. 53, n. 4, p. 439-444.
- Huang, J. T.; Airey, D. W. (1993). *Effects of Cement and Density on a Artificially Cemented Sand*. In: *International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks*. Athens, Rotterdam: A. A. Balkema, v. 1, p. 553-560.
- Ingles, O. G.; Metcalf, J. B. (1972). *Soil Stabilization – Principles and Practice*. Australia: Butterworths Pty. Limited, 366 p.
- Ismail, M. A.; Joer, H. A.; Randolph, M. F.; Meritt, A. (2002). *Cementation of Porous Materials Using Calcite*. *Géotechnique*, v. 52, n. 5, p. 313-324.
- Marinho, F. A. M. (1995). *A Técnica do Papel filtro para Medição de Sucção*. In: *Encontro sobre Solos Não Saturados*. Porto Alegre: CPGEC/CNPQ/FINEP/FAPERGS/ABMS, v.1, p.111-125.
- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of Soil Behavior*. New York: John Wiley & Sons Inc., 422p.
- Núñez, W. P. (1991). *Estabilização Físico-Química de um Solo de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 150p.
- Rotta, G. V.; Consoli, N. C.; Prietto, P. D. M.; Coop, M.R.; Graham, J. (2003). *Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress*. *Géotechnique*, v. 53, n. 5, p. 493-501.
- Schnaid, F.; Prietto, P.D.M.; Consoli, N.C. (2001). *Prediction of Cemented Sand Behavior in Triaxial Compression*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v.127, n.10, p.857-868.
- Thomé, A.; Donato, M.; Consoli, N. C.; Graham, J. (2005). *Circular Footings on a Cemented Layer above Weak Foundation Soil*. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 42, n.º 6, p. 1569-1584.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	massa de água
C	teor de cimento, medido em relação à massa de solo seco
c_i	massa de cimento
C_{iv}	teor volumétrico de cimento, medido em relação ao volume total do corpo-de-prova
C_u	coeficiente de uniformidade
D_{10}	diâmetro efetivo
n	porosidade
PVC	Acetato de Polivinila
q_u	resistência à compressão simples
S	grau de saturação
V_{ci}	volume de cimento
V_v	volume de vazios
w	teor de umidade do papel filtro
ϕ	diâmetro
γ_d	peso específico aparente seco
ω	teor de umidade, medido em relação à soma das massas de solo seco e cimento