

A INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DE UMA AREIA ARTIFICIALMENTE CIMENTADA

The influence of cement type on the compressive strength of artificially cemented sand

Jonatan Garrido Jung*

Fernanda Stracke**

Eduardo Pavan Korf***

Nilo Cesar Consoli****

RESUMO – A técnica de melhoramento de solos de baixa capacidade de suporte utilizando cimento Portland tem sido empregada em vários países pelo mundo. O conhecimento dos fatores que influenciam o desempenho de um solo melhorado é de fundamental importância para ser possível a aplicação da técnica. Pesquisas desenvolvidas por Consoli *et al.* (2007, 2009, 2010) trouxeram uma metodologia racional de dosagem para solo-cimento baseada na relação índice de vazios/teor de cimento. É de conhecimento geral que o tipo de cimento influencia diretamente na resistência final do concreto. Entretanto, pouco se sabe sobre este efeito em misturas de solo-cimento. Neste contexto, este estudo visa avaliar a influência do tipo de cimento na resistência mecânica de um solo artificialmente cimentado. O programa experimental realizado foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples. Foram avaliados três tipos de cimento Portland (CPV; CII-E; CII-V), além de quatro teores de cimento (3%, 5%, 7%, 9%) e três índices de vazios (0,65; 0,73; 0,81) das misturas solo-cimento. O tempo de cura foi de 28 dias para todos os tipos de cimento. Os resultados mostraram que o tipo de agente cimentante influencia significativamente a resistência final do solo melhorado, sendo que as maiores resistências foram obtidas, respectivamente, para o cimento Portland CP V, CP II-E e CP IV.

ABSTRACT – The technique of ground improvement of low bearing capacity soils using Portland cement has been used in many countries. The knowledge of the factors that influence the ground improved performance is of basic importance regarding the application of the technique. Research developed by Consoli *et al.* (2007, 2009, 2010) brought a rational methodology of dosage for ground-cement based on porosity/cement ratio. It is of common knowledge that the cement type influences directly the final resistance of concrete. However, little is known about this effect in ground-cement mixtures. In this context, the study aims to evaluate the influence of the type of cement in the mechanical behavior of an artificially cemented soil. The experimental program was based on unconfined compression tests considering three types of Portland cement (CPV, CII-E, CII-V), four cement percentages (3%, 5%, 7%, 9%) and three void ratios (0.65; 0.73; 0.81) of the ground-cement mixtures. The curing time was 28 days for all the types of cement. The results have shown that the type of cementitious agent significantly influences the resistance of improved ground at 28 days of curing, the highest resistance having been reached for the early strength Portland cement (CP V), followed by ordinary Portland cement with small insertion of slag (CP II-E) and pozzolanic Portland cement (CP IV).

PALAVRAS CHAVE – Resistência à compressão, solo-cimento, cimento Portland.

* Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: jonatan.jung@gmail.com

** Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: festracke@hotmail.com

*** Engenheiro Ambiental, Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: eduardokorf@gmail.com

**** Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

E-mail: consoli@ufrgs.br

1 – INTRODUÇÃO

O cimento Portland tem sido utilizado no melhoramento de solos em vários países pelo mundo. No Brasil são comercializados diversos tipos de cimento Portland, os quais são regidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), onde suas características e requisitos são descritos. Na busca por uma metodologia racional de dosagem para solo-cimento, iniciada por Consoli *et al.* (2007, 2009, 2010), este estudo tem o objetivo de ampliar o conhecimento neste tema analisando a influência do tipo de cimento Portland na dosagem de projetos envolvendo melhoramento de solos usando este agente cimentante. Na medida em que se identificam as variáveis que controlam a resistência de solos melhorados com cimento, pode se otimizar os projetos que utilizam esta técnica. Assim como na dosagem de concreto, a escolha do tipo de cimento terá importante influência na resistência obtida pela mistura final, e portanto uma criteriosa escolha se faz necessária para que se obtenha a melhor solução do ponto de vista técnico e econômico. Neste contexto, o objetivo principal do estudo é comparar os resultados de resistência obtidos em ensaios de compressão simples de corpos de prova moldados com três dos principais tipos de cimentos Portland do Brasil, e desta forma quantificar a influência do tipo de cimento na resistência de uma areia artificialmente cimentada em função do tipo de cimento.

2 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 – Materiais

Nos ensaios foi utilizada areia obtida da região de Osório, próxima a Porto Alegre (sul do Brasil), sendo classificada (ASTM, 1993) como uma areia fina limpa de granulometria uniforme com partículas arredondadas e densidade real dos grãos 2,65. Análises mineralógicas mostraram que as partículas de areia são predominantemente compostas por quartzo. O tamanho dos grãos corresponde à areia fina com diâmetro médio das partículas (D_{50}) igual a 0,16mm, coeficiente de uniformidade e curvatura 1,9 e 1,2 respectivamente (Consoli *et al.*, 2010).

A influência de três agentes cimentantes diferentes foi analisada, sendo eles cimento Portland composto com escória (CP II-E), cimento Portland pozolânico (CP IV) e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V), cujas composições segundo a Norma Brasileira (bem como a densidade real dos grãos) podem ser observadas no Quadro 1. As especificações para estes cimentos são definidas na NBR 11578 (ABNT, 1991a), NBR 5736 (ABNT, 1991c) e NBR 5733 (ABNT, 1991b).

Nos ensaios de caracterização realizados por Consoli *et al.* (2010) foi empregada água destilada, assim como na moldagem dos corpos de prova para os ensaios de compressão da presente pesquisa.

Quadro 1 – Teores dos componentes dos cimentos utilizados.

Tipo de cimento Portland	Densidade real dos grãos	Sigla	Composição (% em massa)			
			Clinker + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Composto	3,12	CP II-E	94-56	6-34	–	0-10
Pozolânico	2,74	CP IV	85-45	–	15-50	0-5
Alta resistência inicial	3,15	CP V-ARI	100-95	–	–	0-5

2.2 – Métodos

2.2.1. – Moldagem e cura dos corpos de prova

Os ensaios de compressão simples foram realizados em corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Uma vez estabelecido um dado índice de vazios (e), o peso específico aparente seco (γ_d) foi calculado conforme a equação 1:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (1)$$

onde γ_s é o peso específico real dos grãos.

Um peso específico aparente seco para um determinado corpo de prova foi então estabelecido através da massa seca de solo-cimento dividida pelo volume total do corpo de prova. Para manter um valor constante do peso específico aparente seco do corpo de prova, uma pequena quantidade de solo foi substituída por cimento. Como as densidades reais dos grãos dos cimentos CP II-E (3,12), CP V (3,15) e CP IV (2,74) são maiores que a densidade real dos grãos de solo (2,65), para o cálculo do índice de vazios e porosidade, um valor composto para a densidade real dos grãos de cada cimento e do solo foi usado, baseado nas porcentagens de solo e cimento usadas nos corpos de prova. A quantidade de cimento para cada mistura era calculada baseada na massa de solo seco. Após solo, cimento e água serem pesados, o solo e o cimento eram misturados até adquirirem uma aparência uniforme. A água era então adicionada, continuando-se o processo de mistura até que uma pasta homogênea fosse obtida. Após a mistura do material suficiente para um corpo de prova, a mistura era dividida em três recipientes cobertos para evitar perdas de umidade até a compactação subsequente.

O corpo de prova era então compactado estaticamente em três camadas dentro de um molde cilíndrico tripartido, de modo que cada camada atingisse o peso específico aparente seco desejado. O topo de cada camada era levemente escarificado.

Após o processo de moldagem, o corpo de prova era imediatamente extraído do molde, e seu peso, diâmetro e altura medidos com precisão da ordem de 0,01g e 0,1mm, respectivamente. O tempo utilizado na preparação – mistura e compactação – foi sempre inferior a 1 hora, tempo mínimo para o início da pega dos três tipos de cimento usados.

Os corpos de prova eram então colocados dentro de sacos plásticos para evitar variações significativas de umidade. A cura era realizada por 27 dias em local com temperatura de $23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$. Após este tempo, os corpos de prova eram submersos em um tanque com água por 24 horas para promover a saturação e minimizar a sucção. A temperatura da água era mantida em $23^\circ \pm 3^\circ\text{C}$. O tempo total do processo de cura era de 28 dias.

Os corpos de prova eram considerados apropriados para serem testados se estivessem dentro da seguinte faixa de tolerância para os valores desejados:

- Peso específico aparente seco (γ_d): $\pm 1\%$.
- Teor de umidade (w): $\pm 0,5\%$.
- Dimensões: diâmetro entre $\pm 0,5\text{mm}$ e altura $\pm 1\text{mm}$.

2.2.2. – Ensaios de compressão simples

O programa experimental empregou ensaios de compressão simples para verificar a eficiência do melhoramento com os diferentes agentes cimentantes estudados. Este tipo de ensaio tem sido utilizado por diversos pesquisadores para avaliar a eficácia da técnica de estabilização de solos com

cimento, e quantificar a influência dos fatores determinantes para a resistência de solos cimentados. Uma das razões para isso é a experiência acumulada com este tipo de ensaio para concreto. Os ensaios geralmente seguem a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo simples e rápido, e ainda assim confiável e barato.

Uma prensa automática com capacidade máxima de 50kN e anéis de carga com capacidade de 10kN e 50kN e resoluções de 0,005kN e 0,023kN respectivamente, foram usados para os ensaios de compressão simples.

Após o processo de cura, imediatamente antes do ensaio os corpos de prova eram removidos do tanque e secos superficialmente com um pano absorvente. Então, o ensaio de compressão simples era realizado e a carga máxima registrada.

2.2.3. – Programa de ensaios de compressão simples

O programa experimental realizado neste trabalho foi baseado em ensaios de resistência à compressão simples, e tem o objetivo de analisar a influência do tipo de cimento na resistência de um solo melhorado com estes materiais.

Para cada um dos três tipos de agente cimentante estudados, foram moldados corpos de prova de solo-cimento com diferentes índices de vazios (0,65; 0,73 e 0,81), diferentes teores de cimento (3%, 5%, 7% e 9%) e com a mesma umidade ($\omega \sim 10\%$). Estas porcentagens foram escolhidas seguindo a experiência brasileira e internacional com solo-cimento [por exemplo, Mitchell (1981), Consoli *et al.* (2003, 2006, 2007 e 2009), Thomé *et al.* (2005)]. Para cada combinação, foram moldados três corpos de prova.

3 – RESULTADOS – Efeito do tipo de cimento na resistência à compressão simples

Os resultados dos ensaios de compressão simples são apresentados nas Figuras 1 a 3. Os gráficos apresentam a resistência como função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para os três tipos de cimento usados nas misturas. A razão vazios/cimento, porosidade (η) dividida pelo teor volumétrico de cimento (C_{iv}), este último expresso como o volume percentual de cimento em relação ao volume total, é definida pela equação 2:

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \frac{\left(\frac{V_v}{V_{total}}\right)}{\left(\frac{V_c}{V_{total}}\right)} = \frac{V_v}{V_c} \quad (2)$$

onde V_v é o volume de vazios (água + ar) no corpo de prova, V_c é o volume de cimento do corpo de prova e V_{total} é o volume total do corpo de prova.

A Figura 1 apresenta a resistência à compressão em função da razão vazios/cimento das misturas utilizando como agente cimentante o CP II-E, e pode-se observar uma boa correlação para os resultados (equação 3).

$$q_u (kPa) = 30487 \cdot \left(\frac{\eta}{C_{iv}}\right)^{-1,32} \quad (3)$$

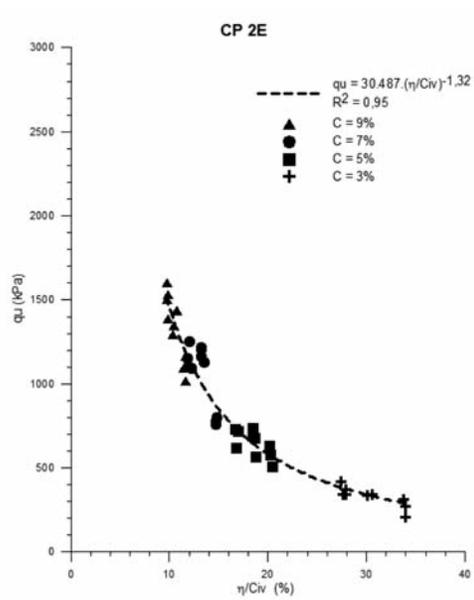


Fig. 1 – Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para CP II-E.

A Figura 2 apresenta a resistência à compressão em função da razão vazios/cimento das misturas utilizando como agente cimentante o CP IV, onde pode ser observar novamente boa correlação para os resultados (equação 4).

$$q_u (kPa) = 111692. \left(\frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{-1.91} \quad (4)$$

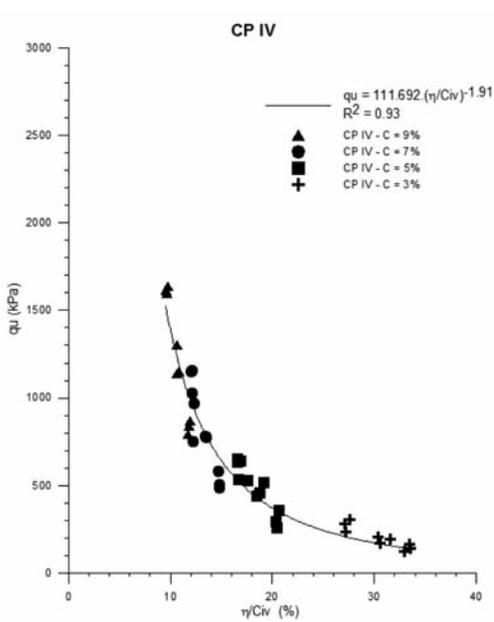


Fig. 2 – Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para CP IV.

A Figura 3 apresenta a resistência à compressão em função da razão vazios/cimento das misturas utilizando como agente cimentante o CP V, e pode-se observar razoável correlação para os resultados (equação 5).

$$q_u (kPa) = 103700 \cdot \left(\frac{\eta}{C_{iv}} \right)^{-1,69} \quad (5)$$

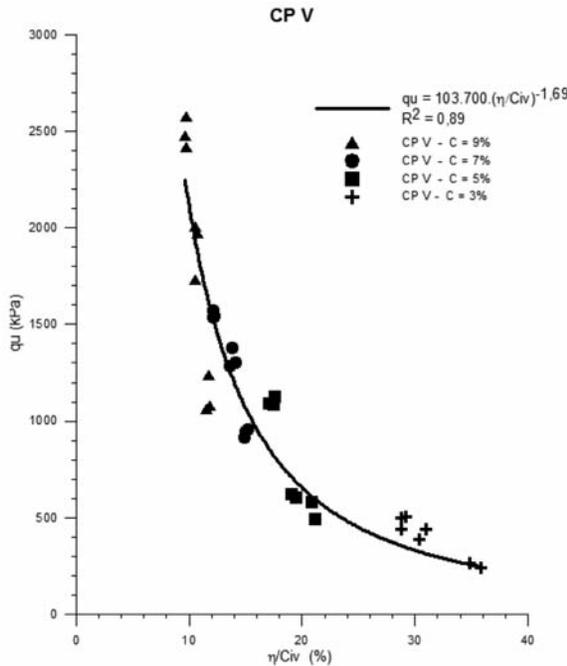


Fig. 3 – Variação da resistência à compressão simples com a razão vazios/cimento para CP V.

A Figura 4 apresenta curvas de tendência dos resultados apresentados nas Figuras 1 a 3 ajustadas para o mesmo expoente (-1,60). Observando-se as curvas dos três tipos de cimento usados, pode-se constatar a influência do tipo de agente cimentante na resistência à compressão simples. As maiores resistências foram atingidas com o uso do CP V, seguidas pelo CP II-E que apresentou resultados intermediários, e por fim o CP IV que obteve os resultados de resistência mais baixos entre os três tipos de cimento estudados.

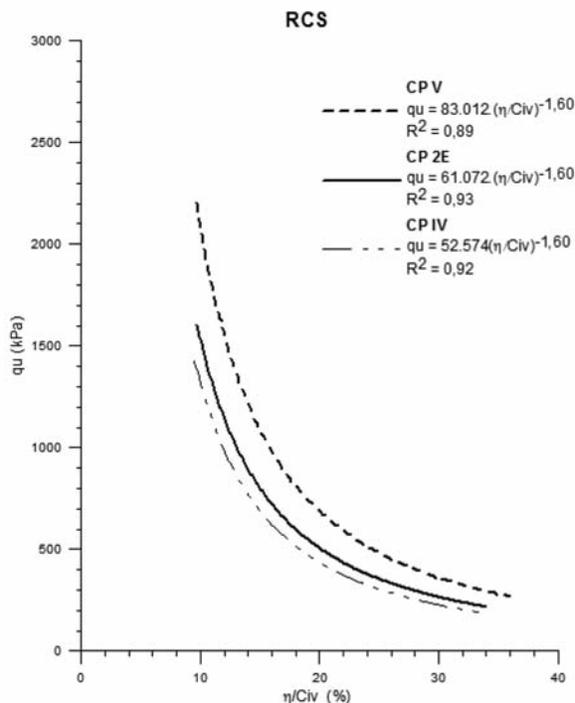


Fig. 4 – Variação da resistência à compressão simples com o tipo de cimento.

Os resultados do estudo mostram que a escolha do agente cimentante usado na mistura tem fundamental importância na resistência final do solo melhorado.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo mostrou que a escolha do agente cimentante irá influenciar diretamente a resistência a 28 dias de cura para uma mistura de areia de Osório-cimento Portland. As maiores resistências foram atingidas, em ordem decrescente, por CP V, CP II-E e CP IV.

A mistura areia de Osório-cimento Portland contendo CP II-E apresentou resistência média 16% superior à observada para o CP IV. Para os corpos de prova moldados com CP V, que atingiram os valores mais altos de resistência à compressão simples, os resultados foram em média 36% superiores aos do CP II-E, e 58% superiores aos do CP IV.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq-MCT e a CAPES-MEC pelo apoio ao grupo de pesquisa.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D 2487 (1993). *Standard classification of soils for engineering purposes*. Philadelphia.
- ABNT NBR 11578 (1991a). *Cimento Portland composto*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 5733 (1991b). *Cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 5736 (1991c). *Cimento Portland pozolânico*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 5739 (2007). *Concreto – ensaios de compressão corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- 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, vol. 129, nº 1, pp. 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, vol. 56, nº 1, pp. 69-72.
- Consoli, N. C.; Foppa, D.; Festugato, L.; Heineck, K. S. (2007). *Key parameters for strength control of artificially cemented soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 133, nº 2, pp. 197-205.
- Consoli, N. C.; Viana da Fonseca, A.; Cruz, R. C.; Heineck, K. S. (2009). *Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 135, nº 9, pp. 1347-1353.
- Consoli, N. C.; Cruz, R. C.; Floss, M. F.; Festugato, L. (2010). *Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, vol. 136, nº 5, pp. 759-763.
- Mitchell, J. K. (1981). *Soil improvement – State of the art report*. Proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10, Estocolmo. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Thomé, A.; Donato, M.; Consoli, N. C.; Graham, J. (2005). *Circular footings on a cemented layer above weak foundation soil*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 42, nº 6, pp. 1569-1584.