

Comportamento e normalização de uma mistura areia-cimento em função do tempo de cura

Sérgio Filipe Veloso Marques
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, smarques@ufrgs.br

Nilo Cesar Consoli
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

Lucas Festugato
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, lucas@ufrgs.br

RESUMO: A busca por novas soluções técnicas que tornem as obras de engenharia mais econômicas e com a mínima agressão ao meio ambiente, tem sido uma das linhas de pesquisa do grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O objetivo do trabalho foi buscar a normalização da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) e o tempo de cura (t). Depois de apresentada a normalização, um programa laboratorial foi realizado, a fim de comprovar a sua efetividade, e que consistiu em ensaios à compressão simples (q_u) de misturas de areia com cimento para diferentes valores da razão vazios/cimento (η/C_{iv}). Os resultados mostraram que se pode obter, de uma maneira simples e rápida, e com uma boa confiabilidade, uma previsão da resistência à compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para diferentes tempos de cura.

PALAVRAS-CHAVE: mistura solo-cimento, resistência à compressão simples, tempo de cura, normalização

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas soluções técnicas que tornem as obras de engenharia mais econômicas e com a mínima agressão ao meio ambiente, tem sido uma das linhas de pesquisa do grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). No melhoramento de solos o cimento Portland é mundialmente usado, principalmente em misturas solo-cimento, já que confere melhorias significativas, de resistência e deformabilidade em solos outrora impróprios para a aplicação de obras de engenharia, como, por exemplo, sub-bases de rodovias ou bases de fundações superficiais (Marques *et al.*, 2014; Consoli *et al.*, 2009).

A primeira metodologia racional de dosagem de uma mistura solo-cimento, desenvolvida por Consoli *et al.* (2007), mostrou que a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), definida pela porosidade da mistura compactada (η) dividida pelo teor

volumétrico de cimento (C_{iv}), é adequada como parâmetro para avaliar a resistência à compressão simples (q_u) da mistura solo-cimento. Quando o solo da mistura é areia está comprovado que esta metodologia se adequa perfeitamente [Consoli *et al.* (2010, 2011, 2012a, 2012b)].

Este estudo tem como objetivo normalizar os resultados de Consoli *et al.* (2011) da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) para dois tempos diferentes de cura (7 e 28 dias). Posteriormente, para comprovar a eficiência da normalização, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples (q_u) para um tempo de cura de 14 dias.

2 MATERIAL USADO

O solo usado neste trabalho foi uma areia proveniente do município de Osório/RS-Brasil. A areia de Osório tem uma granulometria fina, é limpa, uniforme e não contém matéria orgânica. Os seus índices físicos e curva granulométrica podem ser vistos, respectivamente, na Tabela 1 e Figura 1.

Tabela 1. Índices físicos da areia de Osório

Índices Físicos	Areia de Osório
Massa específica real dos grãos (g/cm^3)	2,65
Coeficiente de uniformidade, C_u	2,11
Coeficiente de curvatura, C_c	1,15
Diâmetro D_{10} (mm)	0,11
Diâmetro D_{50} (mm)	0,20
Diâmetro D_{90} (mm)	0,36
Índice de vazios mínimo, $e_{\min}$	0,60
Índice de vazios máximo, $e_{\max}$	0,85

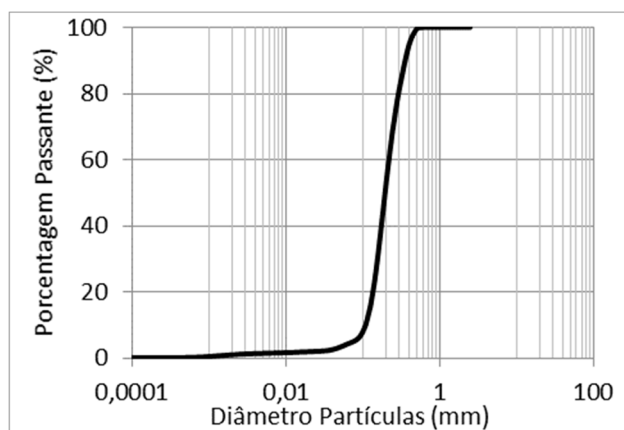


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica da areia de Osório

O material cimentante utilizado foi o cimento Portland com uma alta resistência inicial (CP V), que têm como componentes essenciais o CaO (obtido de calcário), SiO_2 e Al_2O_3 (obtidos de argilas, preferencialmente cauliniticas), com pequenas quantidades de Fe_2O_3 (proveniente de impurezas da argila). A massa específica real dos seus grãos é de $3,15 \text{ g/cm}^3$.

Foi utilizada água destilada para a mistura do solo com cimento.

3 ANÁLISE DE DADOS

O ensaio de resistência à compressão simples (q_u), sendo um ensaio confiável, mundialmente usado e de baixo custo, tem sido utilizado na investigação de diferentes variáveis e de metodologias de dosagem em misturas solo-cimento. Como já referido anteriormente, uma metodologia de dosagem foi desenvolvida considerando a relação vazios/cimento (η/C_{iv}), que é definida pela razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}). As Figuras 2 e 3, obtidos de Consoli *et al.* (2011), mostram os resultados da resistência à compressão simples (q_u) em função destes dois últimos parâmetros, e que serviram de base para este trabalho. O modo de moldagem e os valores utilizados nesta serão discutidos posteriormente neste trabalho.

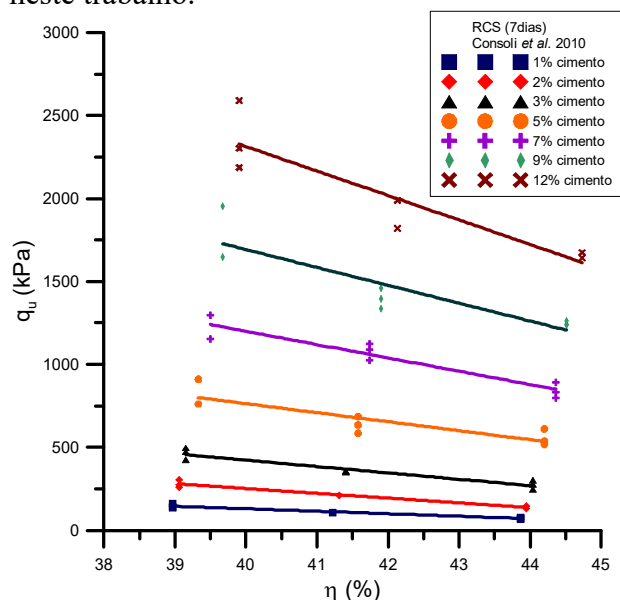


Figura 2. Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a porosidade (η) para um tempo de cura de 7 dias.

Como se pode comprovar pelos resultados, para 7 dias de cura, a resistência à compressão simples (q_u) diminui com o aumento da porosidade (η), sendo esse efeito mais notório quanto maior a porcentagem de cimento utilizada (Figura 2) e aumenta com a porcentagem de cimento (C_i), sendo tanto maior quanto menor a porosidade (Figura 3). Os resultados para o tempo de cura de 28 dias não serão aqui apresentados, já que têm um comportamento análogo.

A Figura 4 apresenta, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, as curvas únicas de resistência à

compressão simples (q_u) em função da relação vazios/cimento (η/C_{iv}) mostrando uma boa correlação ($R^2 > 0.92$) com os resultados.

Os resultados na Figura 4 mostram que quanto menor o valor da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) maior a resistência à compressão simples (q_u) e também que existe um aumento geral (cerca de 50%) das resistências à compressão simples (q_u) para o tempo de cura de 28 dias em relação ao tempo de cura de 7 dias.

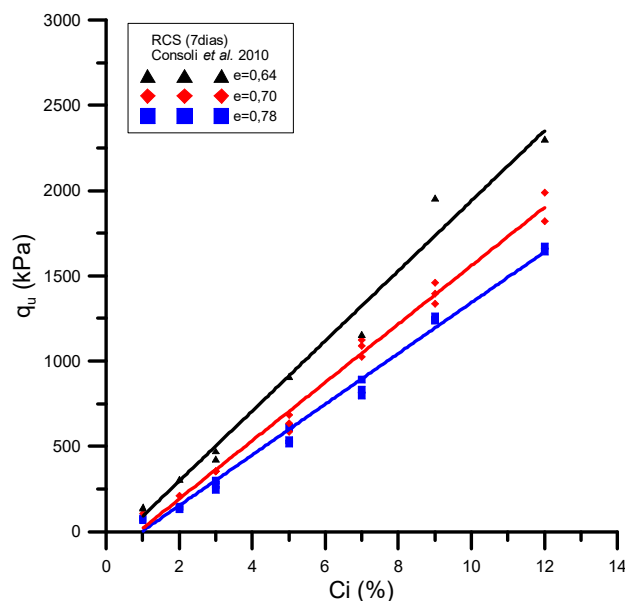


Figura 3. Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a porcentagem de cimento (C_i) para um tempo de cura de 7 dias.

Os resultados até agora apresentados neste trabalho mostram que, para um determinado tempo de cura, pode-se escolher uma quantidade de cimento e/ou uma porosidade apropriada para uma determinada mistura solo-cimento que obtenha a resistência adequada ao projeto com um custo ótimo. A melhor opção pode mudar de situação para situação, dependendo da existência de equipamento, ou o seu custo, para atingir uma determinada porosidade ou então do custo do cimento, por exemplo.

E se o tempo de cura for diferente dos tempos estudados? Para qualquer outro tempo de cura diferente do estudado, terá que ser feito um estudo específico para a determinação da curva $q_u - \eta/C_{iv}$. Uma solução seria utilizar uma interpolação ou extrapolação dos resultados já obtidos (7 e 28 dias) para estimar a resistência para um determinado valor de η/C_{iv} . O ideal seria existir uma normalização dos valores da resistência à compressão simples (q_u), já que a

razão vazios/cimento (η/C_{iv}) é admissional, tornando a curva $q_u - \eta/C_{iv}$ independente do tempo de cura. Essa normalização é o objetivo deste trabalho e será demonstrada a seguir.

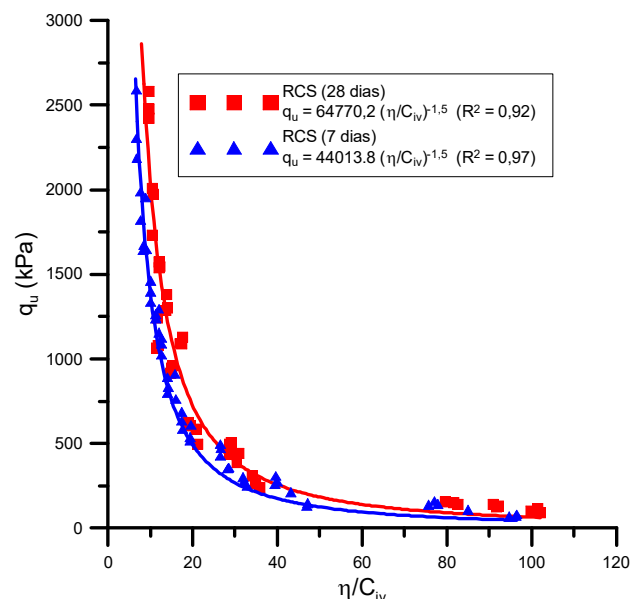


Figura 4. Variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

4 NORMALIZAÇÃO

Sendo o eixo das abcissas, da razão vazios/cimento (η/C_{iv}), como já referido anteriormente, admissional então a solução passa por tornar o eixo das ordenadas admissional, correspondente às resistências à compressão simples (q_u). O objetivo foi encontrar uma solução única que englobasse todos os resultados, ou seja, que substituísse as equações (1) e (2) por uma equação única.

Tempo de cura de 7 dias:

$$q_u = 44013,8 \times (\eta/C_{iv})^{-1,5} \quad (1)$$

Tempo de cura de 28 dias:

$$q_u = 64770,2 \times (\eta/C_{iv})^{-1,5} \quad (2)$$

A solução para a normalização passou então por encontrar um multiplicador comum para as equações (1) e (2), já que elas são do mesmo formato (potencial) e a componente referente ao eixo das abcissas e o seu expoente são iguais [$(\eta/C_{iv})^{-1,5}$]. Para isso dividiu-se a resistência à compressão simples (q_u) de todos os pontos que

compõe as curvas da Figura 4 por uma resistência de referência, para cada tempo de cura, que foi obtida a partir de um determinado η/C_{iv} . Essa resistência de referência pode ser determinada como mostra a Figura 5 ou então através das equações (1) e (2), sendo este último método, tanto mais prático como mais preciso. Para este estudo foi utilizado o $\eta/C_{iv}=20$ mas, como se poderá verificar mais à frente neste trabalho, a normalização é independente deste valor, podendo-se utilizar qualquer valor de η/C_{iv} , desde que ele se encontre entre o intervalo mínimo e máximo do conjunto de valores apresentado nas duas curvas.

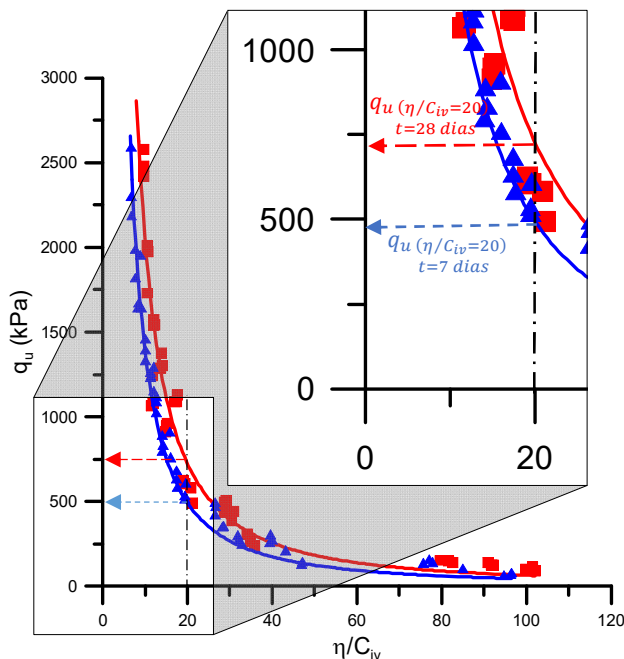


Figura 5. Zoom da Figura 4 com exemplo da determinação da resistência à compressão simples (q_u) para um $\eta/C_{iv}=20$ e para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

Tempo de cura de 7 dias:

$$q_{u(\eta/C_{iv}=20)} = 44013,8 \times (20)^{-1,5} = 492,1 \text{ kPa} \quad (3)$$

Tempo de cura de 28 dias:

$$q_{u(\eta/C_{iv}=20)} = 64770,2 \times (20)^{-1,5} = 724,2 \text{ kPa} \quad (4)$$

Assim, a divisão de todos os resultados da resistência à compressão simples (q_u) pela resistência de referência de 492,1 kPa e 724,2 kPa, respectivamente, para os tempos de cura de 7 e 28 dias, obtidos nas equações (3) e (4), transforma todos esses valores da resistência à

compressão simples (q_u) da Figura 4 em valores de resistência à compressão simples normalizados ($q_u/q_{u(\eta/C_{iv}=20)}$) como mostra a Figura 6.

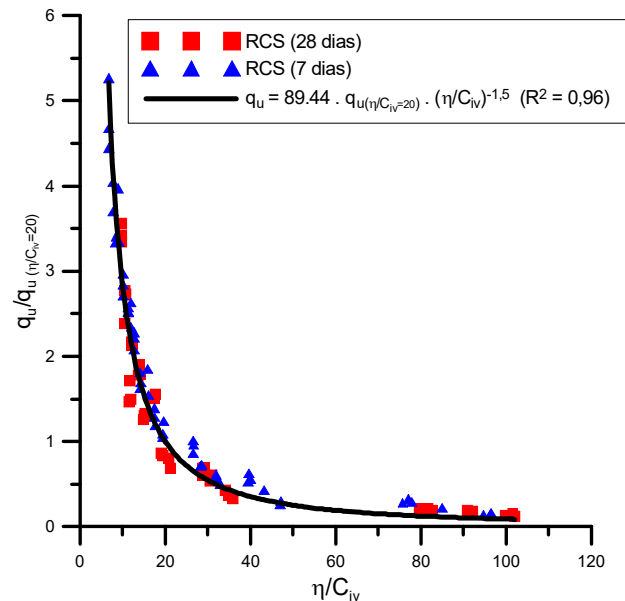


Figura 6. Normalização da variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

Com essa normalização conseguiu-se obter uma curva única [equação (5)], com um ajuste muito bom ($R^2=0,96$), que representa os resultados de resistência à compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para dois tempos de cura diferentes.

$$q_u = 89,44 \times q_{u(\eta/C_{iv}=20)} \times (\eta/C_{iv})^{-1,5} \quad (5)$$

Analisando a equação (5), ela mostra que se poderá obter uma curva semelhante às equações (1) e (2) somente entrando na equação com o valor da resistência à compressão simples para um determinado η/C_{iv} [$q_{u(\eta/C_{iv}=20)}$], neste caso igual a 20. Isto significa que se se quiser saber a curva específica da resistência à compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para um tempo de cura de, por exemplo, 14 dias, bastaria determinar, através de um único ensaio, a sua resistência à compressão simples (q_u) para um $\eta/C_{iv}=20$.

Para este trabalho foi escolhido a razão $\eta/C_{iv}=20$, mas poderia ter sido utilizada outra qualquer, desde que dentro dos limites mínimos e máximos do conjunto de valores apresentado nas duas curvas, como descrito anteriormente. A

Figura 7 apresenta a comparação da mesma curva apresentada na Figura 6 ($\eta/C_{iv}=20$) mas com a determinação da resistência de referência utilizando $\eta/C_{iv}=40$. A curva desta última razão somente sofreu uma translação (o multiplicador passou de 89,44 para 252,98); o valor do coeficiente de determinação, R^2 , manteve-se inalterado.

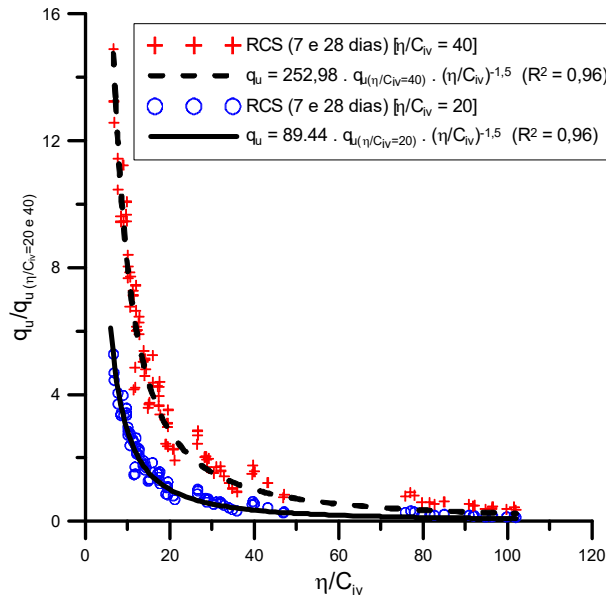


Figura 7. Normalização da variação da resistência à compressão simples (q_u) com as relações vazios/cimento ($\eta/C_{iv}=20$ e $\eta/C_{iv}=40$) para os tempos de cura de 7 dias e 28 dias.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para comprovar, realmente, a eficiência da normalização será mostrado, neste ponto, a determinação da curva da resistência à compressão simples (q_u) de uma mistura de areia de Osório + cimento em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para um tempo de cura de 14 dias através equação (5).

Como explicado anteriormente, basta determinar a resistência à compressão simples (q_u) para um determinado η/C_{iv} [$q_u(\eta/C_{iv}=20)$], neste caso igual a 20, para a determinação da curva. Além da comparação dos resultados com as outras equações (1) e (2) foram ainda determinadas as resistências à compressão simples (q_u) para outros valores de η/C_{iv} afim de confirmar a efetividade da curva determinada pela equação (5).

Em seguida será descrito o modo de

moldagem dos corpos de prova utilizados, que seguiu a mesma metodologia adotada por Consoli *et al.* (2011).

5.1 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para todos os ensaios, corpos de prova com 100 mm de altura de 50 mm de diâmetro foram utilizados. Depois do solo, cimento e a água terem sido pesados, eles foram misturados até se obter uma mistura uniforme. De seguida, cada mistura foi compactada em três camadas, de modo a se obter as especificações de teor de umidade e peso específico aparente seco. Depois de desmoldado, o peso, a altura e o diâmetro do corpo de prova eram medidos com uma resolução de 0,01 g e 0,1 mm. Seguidamente o corpo de prova era acondicionado num saco de plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas no teor de umidade. Os corpos de prova que cumpriam os requisitos de peso ($\pm 1\%$), dimensões ($\pm 1\%$) e umidade ($\pm 2,5\%$) eram considerados aptos para o ensaio de compressão simples.

Os corpos de prova foram submersos em um tanque com água, por um período de 24 horas, antes da realização do ensaio à compressão simples, visando aproximar a condição de saturação, a fim de minimizar o efeito da sucção.

5.2 Ensaio de resistência à compressão simples

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples (q_u) foi utilizada uma prensa automática com uma capacidade máxima de 50 kN, utilizando um anel dinamométrico calibrado, com capacidade de 10 kN e resolução de 0,005 kN, seguindo os procedimentos gerais descritos na norma NBR 12025/90. A velocidade de deformação destes ensaios foi de 1,14 mm por minuto. Como critério de aceitação para o ensaio à compressão simples, estipulou-se que: dos corpos de prova moldados se considerava que a resistência individual não se afastava mais de 10% da resistência média desse conjunto.

5.3 Programa de ensaios de resistência à compressão simples

Como descrito anteriormente, foi necessário, em

primeiro lugar, determinar a resistência à compressão simples (q_u) para um $\eta/C_{iv}=20$. Para dissipar possíveis erros foi considerada a média da resistência de três corpos de prova em que cada valor individual não se afastasse mais ou menos de 10% da média dos três. Desse valor médio foi determinada a curva única que relacione a resistência à compressão simples (q_u) com a razão vazios/cimento (η/C_{iv}), para um tempo de cura de 14 dias, utilizando a equação (5).

Para comprovar a efetividade dessa curva foram realizados outros ensaios para diferentes η/C_{iv} (10, 17, 30, 40 e 80) garantindo que a resistência individual não se afastasse de $\pm 10\%$ da média dos resultados da resistência de cada conjunto. Devido a ser somente para verificação e confirmação foram só realizados dois corpos de prova por cada η/C_{iv} .

6 RESULTADOS

Determinado o valor médio da resistência à compressão simples (q_u) para $\eta/C_{iv}=20$, igual a 591,8 kPa, e aplicando-o na equação (5), obteve-se a seguinte equação:

$$q_u = 52930,6 \times (\eta/C_{iv})^{-1,5} \quad (6)$$

As Figuras 8 a 10 mostram os resultados da efetividade da normalização anteriormente exposta. A Figura 8 mostra a comparação da curva anteriormente obtida (para um tempo cura de 14 dias) com as outras curvas já determinadas para os tempos de cura de 7 e 28 dias (Figura 4). Apresenta uma forma semelhante com essas, situando-se ainda, como esperado, entre as duas curvas anteriormente definidas. Na Figura 9 pode-se ver a comparação entre a curva definida através da normalização [equação (6)] e os valores da resistência à compressão simples (q_u) para determinados η/C_{iv} . Por esta figura pode-se comprovar a boa correlação entre os dois, validando, assim, a normalização proposta por este trabalho. A Figura 10, mostra, mais uma vez, que a utilização de uma resistência de referência para efetuar a normalização é eficaz na previsão da resistência à compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para diferentes tempos de cura.

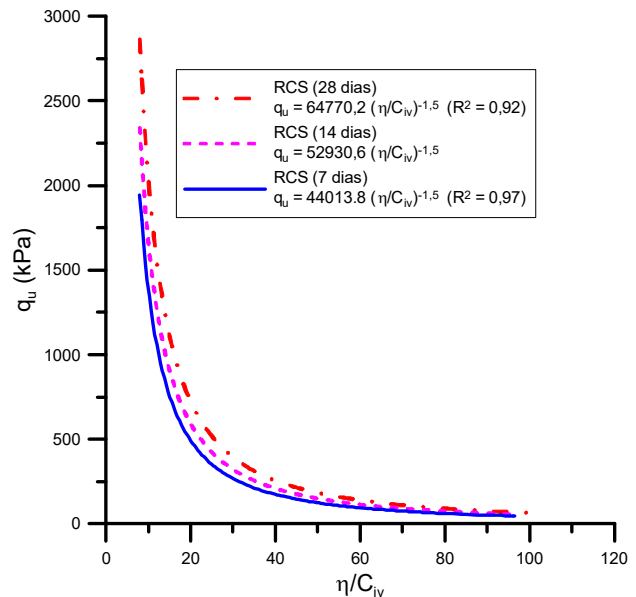


Figura 8. Comparação da variação da resistência à compressão simples (q_u) com as relações vazios/cimento (η/C_{iv}) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias.

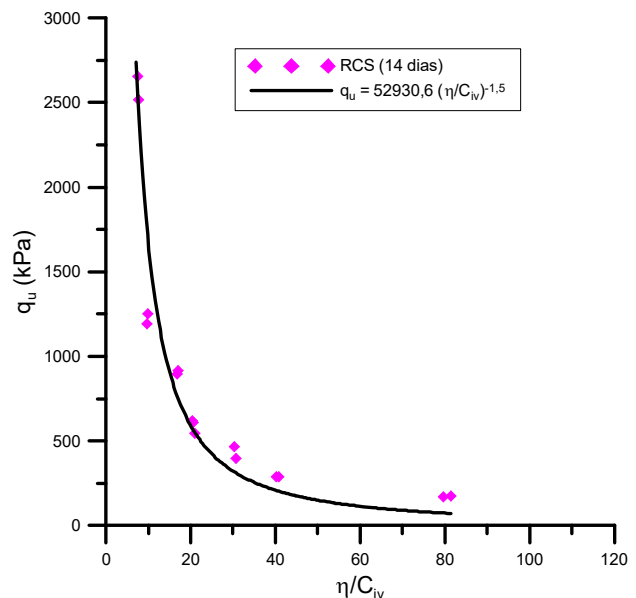


Figura 9. Comparação da resistência à compressão simples (q_u) de diferentes razões vazios/cimento (η/C_{iv}), para um tempo de cura de 14, com a curva obtida por normalização.

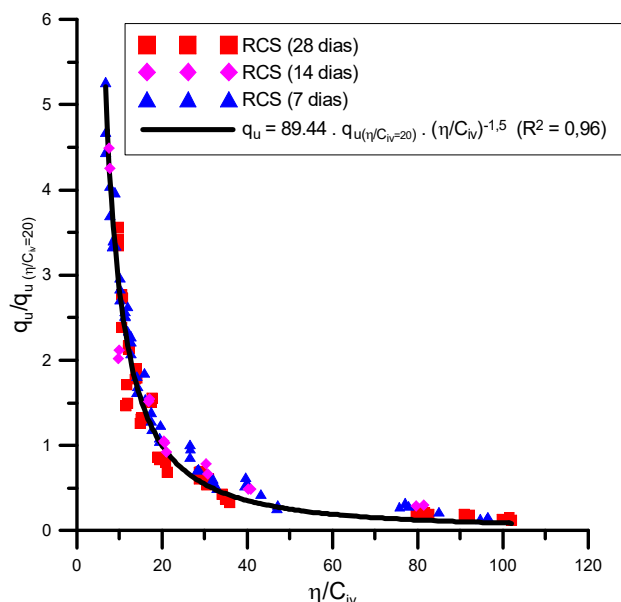


Figura 10. Normalização da variação da resistência à compressão simples (q_u) com a relação vazios/cimento (η/C_{iv}) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias.

7 CONCLUSÕES

O grande benefício com a normalização apresentada neste trabalho é na rapidez, e com uma boa confiabilidade, com que se poderá obter uma previsão da resistência à compressão simples (q_u) em função da razão vazios/cimento (η/C_{iv}) para diferentes tempos de cura; anteriormente era preciso desenvolver todo um planejamento de moldagem de dezenas de corpos de prova, como mostra a Figura 4, para a definição da curva. Com esta normalização basta, teoricamente, um resultado da resistência à compressão simples (q_u) para um determinado η/C_{iv} (na prática, é aconselhável ter, pelo menos, três resultados).

Esta normalização está comprovada para uma mistura de areia-cimento, podendo ser usada para tempos de cura entre 7 e 28 dias. Para outro tipo misturas e tempos de cura é aconselhável realizar mais alguns ensaios de resistência à compressão simples (q_u) para outros valores de η/C_{iv} , afim de aferir a sua aplicabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao CNPq-MCT pelo suporte financeiro ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Consoli, N. C., Cruz, R. C., Consoli, B. S. e Maghous, S. (2012b). Failure envelope of artificially cemented sand. *Géotechnique*, 62(6), 543–547
- Consoli, N. C., Cruz, R. C. e Floss, M. F. (2010) Variables Controlling Strength of Artificially Cemented Sand: Influence of Curing Time. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000205, 692–696
- Consoli, N. C., Cruz, R. C., Floss, M. F. e Festugato, L. (2010) Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 10.1061/(ASCE)GT. 1943-5606.0000278, 759–763
- Consoli, N. C., Dalla Rosa, F. e Fonini, A. (2009). Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil. *J. Geotech. Geoenviron. Engng ASCE* 135, No. 12, 1846–1856.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L. e Heineck, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* ASCE, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007) 133:2(197), 197–205
- Consoli, N. C., Viana da Fonseca, A., Rios Silva, S., Cruz, R. C., e Fonini, A. (2012a). Parameters controlling stiffness and strength of artificially cemented soils. *Géotechnique*, 62(2), 177–183
- Marques, S. F. V., Consoli, N. C. e Almeida e Sousa, J., (2014). Testing Cement Improved Residual Soil Layers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 26, p. 544-550.
- Mitchell, J. K. (1981). Soil improvement—State-of-the-art report. *Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Int. Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., Stockholm, Sweden, 509–565.