

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Uso da Razão Porosidade por Teor Volumétrico na Estimativa do Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso com Adição de Cimento

Guilherme Irineu Venson

Professor/Pesquisador, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, guilhermeivenson@hotmail.com

Pedro Gabriel Brum de Sousa

Graduado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, pedrogbs76@gmail.com

Ayrton Luiz França Mota

Graduado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Cascavel, Paraná, Brasil, ayrton_luiz@hotmail.com

RESUMO: A presente pesquisa teve como objetivo quantificar a influência da quantidade do cimento, da porosidade e da razão porosidade/teor de cimento na estimativa das resistências à compressão (q_u) e à tração (q_t) em misturas solo-cimento. O programa experimental consistiu em fixar os pontos de moldagem considerando quatro massas específicas aparentes secas (γ_d), cinco percentuais de cimento (C_i) em relação à massa de solo seca, um único teor de umidade (w) e um único tempo de cura (t_c). Após a moldagem e cura das amostras, uma série de ensaios de resistência à compressão simples e à tração foi realizada. Os resultados revelaram que o aumento do teor volumétrico de cimento (C_{iv}) bem como a redução da porosidade (η) implicaram no aumento das resistências. A relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}), ajustada por um expoente, demonstrou-se apropriada na estimativa dos valores de ambas as resistências. Obteve-se uma relação escalar única entre as resistências (q_t/q_u), para todas as amostras solo-cimento estudadas, e esta relação se mostrou independente da razão porosidade/teor volumétrico de cimento.

PALAVRAS-CHAVE: Razão porosidade/teor volumétrico; Solo-cimento; Resistência tração-compressão.

ABSTRACT: The present research aims to quantify the influence of the amount of cement, the porosity and the porosity/cement ratio in the evaluation of the unconfined compression strength (q_u) and splitting tensile strength (q_t) in soil-cement mixtures. The experimental program started by determining the molding points, considering four dry weights (γ_d), five cement contents (C_i) in relation to dry mass of soil, a single moisture content (w) and a single curing time (t_c). After the molding and curing of specimens, a series of unconfined compressive tests and splitting tensile tests were done. The results show that the increase in the volumetric cement content (C_{iv}) as well as reduction in porosity (η) led to the increase in compression and tensile strength. The porosity/cement ratio (η/C_{iv}), fitted by an exponent, proved to be appropriate to evaluate both strengths. A unique correlation was found linking both strengths (q_t/q_u), for all soil-cement specimens studied, being independent of the porosity/cement ratio.

KEYWORDS: Porosity/volumetric cement content ratio, Soil-cement, tensile-compressive strength.

1 Introdução

Na engenharia civil, métodos tradicionais frequentemente se deparam com desafios relacionados ao alto custo e/ou problemas ambientais. Para estes casos, o emprego de solos cimentados artificialmente tem se mostrado uma solução vantajosa e propícia em diversos tipos de obras geotécnicas como aterros, taludes, fundações rasas, bases e sub-bases para pavimentos.



Solos tratados com cimento apresentam comportamento mecânico influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam: teor de cimento (C_i), porosidade da mistura (η), teor de umidade (w) e tempo de cura (t_c). Na busca por métodos de dosagem baseados em critérios racionais, como é a relação água/cimento para o concreto convencional, diversas pesquisas com solo-cimento foram desenvolvidas nas últimas décadas (Moore et. al. 1970; Consoli et al., 2007; Diambra et al. 2017). Destas, as que adotaram dosagem fundamentada na relação porosidade/teor volumétrico de cimento apresentaram resultados satisfatórios na estimativa da resistência de solos melhorados.

O objetivo deste trabalho foi quantificar a influência da quantidade de cimento, da porosidade e da razão porosidade/cimento (η/C_{iv}) na estimativa da resistência à compressão (q_u) e à tração (q_t), bem como a relação entre a resistência à tração e à compressão (q_t/q_u) em misturas solo argiloso e cimento. O solo estudado foi classificado como argiloso siltoso, proveniente do município Cascavel, localizado na região oeste do Estado do Paraná.

2 Metodologia

O programa experimental constitui-se em quatro etapas. A primeira, nos ensaios de caracterização do solo e do cimento. A segunda, nos ensaios de compactação de Proctor, necessário para fixar os pontos de moldagem das amostras em quatro massas específicas aparentes secas, cinco percentuais de cimento, um teor de umidade e um tempo de cura. A terceira, na confecção das amostras através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento e cura. A quarta, em uma bateria de ensaios de resistência à compressão simples e de resistência à tração por compressão diametral, totalizando 120 amostras ensaiadas, em triplicatas.

A Tabela 1 resume a relação de ensaios, suas respectivas normas e quantidades realizadas nesta pesquisa.

Tabela 1. Resumo dos ensaios

Etapa	Material	Ensaio	Norma/Método	Nº ensaios
Ensaio Especiais	Solo	Compactação Proctor normal	ABNT NBR 7182/16	05
		Compactação Proctor modificado	ABNT NBR 7182/16	05
Resistência Mecânica	Solo (c.p.)	Compressão simples	ASTM D1633-17	12
		Tração por compressão diametral	ASTM D1633-17	12
	Solo-cimento (c.p.)	Compressão simples	ASTM D1633-17	60
		Tração por compressão diametral	ASTM D1633-17	60

2.1 Materiais

A coleta do solo foi realizada no estado deformado, em quantidade suficiente para a realização dos ensaios previstos. O local de retirada do material foi na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, Paraná.

Os resultados dos ensaios de caracterização do solo estão apresentados na Tabela 2 e na curva de distribuição granulométrica (Figura 1).

Tabela 2. Índices físicos do solo.

Propriedades	Valor
Limite de Liquidez (LL)	60%
Limite de Plasticidade (LP)	44%
Índice de Plasticidade (IP)	16%
Massa específica dos grãos (γ_s)	2,83g/cm ³

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação, descrito na ASTM D2487-17e1 (2017), o solo estudado é classificado como argila siltosa (CM).

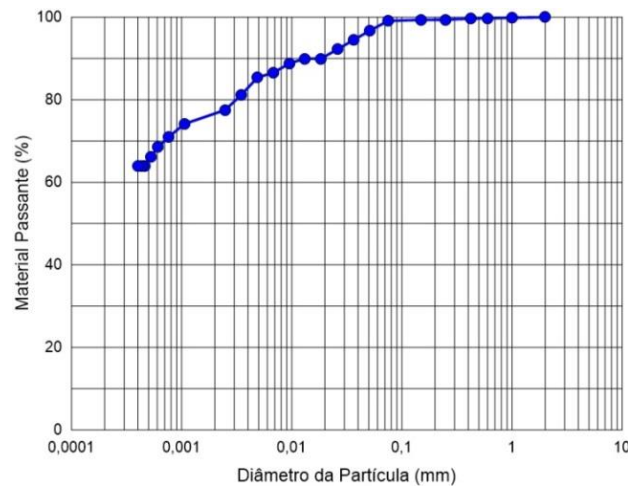


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica.

O cimento empregado neste estudo é um CPV-ARI, composto por pelo menos 95% de clínquer e gesso e até 5% de material carbonático, conforme as determinações da NBR 16697, de forma que os ensaios pudessem ser realizados em um menor período de tempo. A massa específica do cimento obtida em ensaio foi de 2,94g/cm³. Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada água potável, proveniente da rede de abastecimento pública. Já para os ensaios de caracterização utilizou-se água destilada apenas quando especificada pelas suas respectivas normas.

2.2 Determinação dos Pontos de Moldagem

O resultado do ensaio de compactação de Proctor para as energias normal e modificada está apresentado na Figura 2. Foi adotada uma umidade de moldagem de 29% e então escolhidos quatro pontos P4, P3, P2 e P1, onde as massas específicas aparentes secas (γ_d) foram iguais a 1,30; 1,37; 1,44 e 1,51 g/cm³, respectivamente.

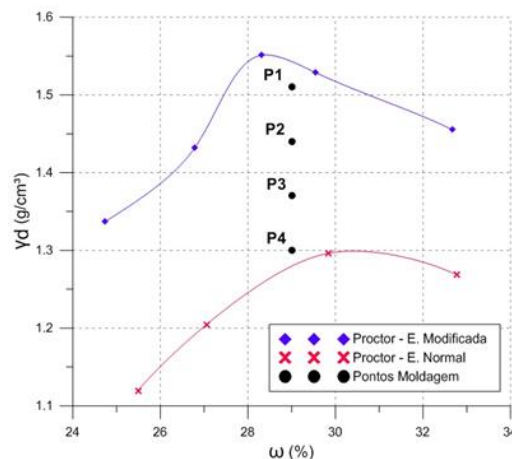


Figura 2. Compactação de Proctor.

Para os teores de cimento foram adotados cinco valores distintos: 2, 4, 6, 8 e 10%. Para cada ponto de moldagem, foram confeccionadas amostras em triplicata. Logo, foram preparados ao todo 120 corpos de prova, 60 destinados aos ensaios de compressão simples e outros 60 destinados aos ensaios de tração.

2.3 Moldagem e Cura das Amostras

Para os ensaios de resistência, foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. A quantidade de cimento necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água em relação à soma das massas de solo seco e cimento. A confecção das

amostras foi realizada através dos procedimentos de pesagem, mistura, compactação, desmoldagem, acondicionamento, armazenagem e cura, explicados a seguir.

Após a pesagem dos materiais (solo, cimento e água), o solo e a cimento foram misturados. Em seguida, foi adicionada água e continuado o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida.

A mistura era compactada em três camadas no interior de um molde metálico com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, com auxílio do aparelho MCV (*Moisture Condition Value*), de modo que cada camada atingisse o peso específico aparente seco preestabelecido, sempre escarificando-se os topos acabados para aumentar a integração entre as camadas. Concluído o processo de compactação, o corpo de prova era imediatamente extraído do molde, e sua massa, diâmetro e altura anotados.

As amostras eram então armazenadas e isoladas, para preservar a umidade de moldagem durante o processo de cura úmida, a qual teve duração de 7 dias. No 6º dia de cura, as amostras foram submersas em água durante 24 horas, para garantir a total saturação. Deste modo, todos os corpos de prova foram rompidos com 7 dias após a data de moldagem.

Foram consideradas aptas para ensaios as amostras que atendiam as seguintes tolerâncias:

- Massa específica aparente seca (γ_d): grau de compactação de 99% a 101%
- Teor de umidade (w): $29 \pm 0,5\%$.
- Dimensões: diâmetro $50 \pm 0,5$ mm e altura 100 ± 1 mm.

2.4 Ensaios de Ruptura: Compressão Simples e Diametral

Neste trabalho, a norma usada como base para a bateria de ensaios foi a ASTM D1633-17 (2017), específica de ensaios de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto.

Assim, passados 7 dias da data de moldagem, as amostras foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão normal e à tração por compressão diametral em prensa hidráulica automática, com anel dinamométrico de capacidade máxima de 10 kN, a para uma taxa de deslocamento controlado de 1,38 mm/min, de modo que as resistências não fossem mascaradas por altas velocidades de carregamento.

3 Resultados e Discussões

3.1 Efeito do Teor de Cimento

Na Figura 4, estão representadas as retas de ajuste bem como as equações que descrevem o comportamento das resistências – à compressão q_u (4a) e à tração q_t (4b) – em função do teor de cimento (C_i) contido nas amostras. Cada uma das quatro retas representa uma massa específica aparente seca (γ_d), sendo estas 1,30; 1,37; 1,44 e 1,51 g/cm³.

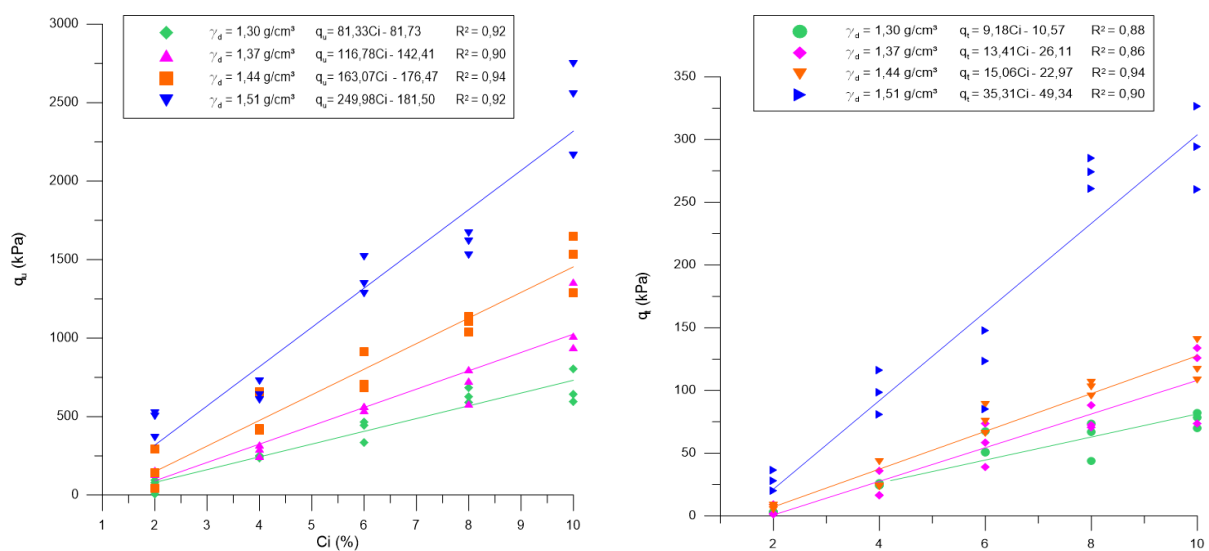


Figura 4. Efeito do teor de cimento: a) Na resistência à compressão. b) Na resistência à tração.

Verifica-se graficamente, para os teores estudados, que as resistências à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) variam positivamente com o aumento do teor de cimento (C_{iv}), e que o acréscimo das resistências ocorre de forma linear.

Observa-se também que quanto maior o peso específico (γ_d) da mistura, maior a inclinação das retas, o que indica ganho de resistência mais efetivo nas misturas mais compactas (1,44 e 1,51g/cm³) que nas misturas mais porosas (1,30 e 1,37g/cm³).

3.2 Efeito da Porosidade

Na Figura 5, estão representadas as retas de ajuste e as respectivas equações que descrevem o comportamento das resistências – à compressão q_u (5a) e à tração q_t (5b) – em função da porosidade (η) dos compósitos. Cada reta corresponde a um dos cinco teores de cimento estudados, sendo eles 2, 4, 6, 8 e 10%.

Analisando os gráficos abaixo, observa-se que as resistências à compressão simples (q_u) e à tração (q_t) aumentam com a redução da porosidade (η), e esta redução acarreta em uma variação linear das resistências, para quaisquer teores de cimento (C_i) estudados.

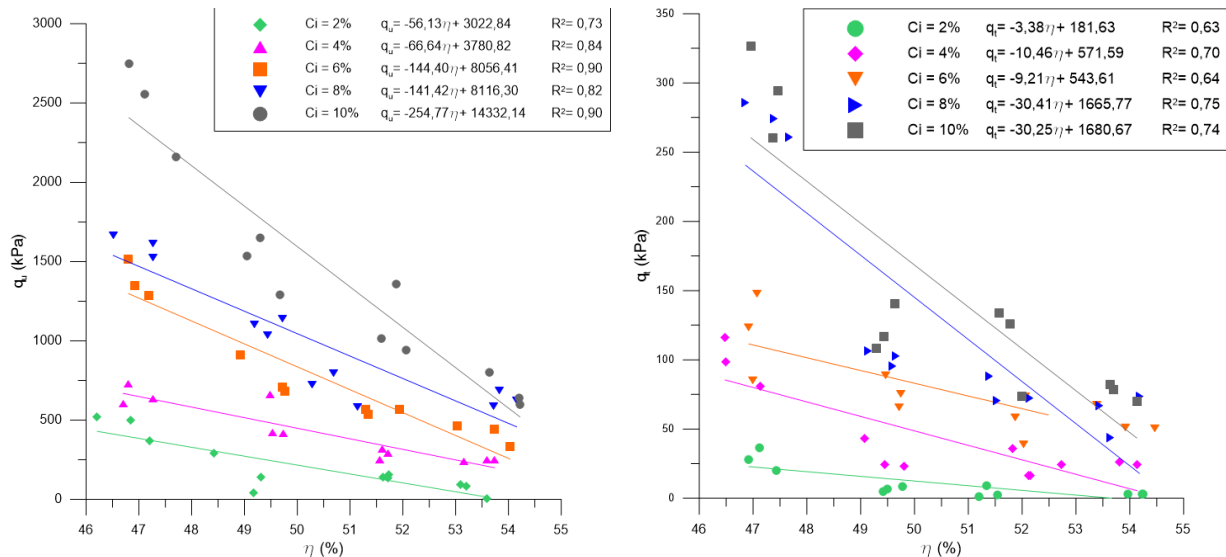


Figura 5. Efeito da porosidade: a) Na resistência à compressão. b) Na resistência à tração.

Adicionalmente, nota-se pela inclinação das retas que o ganho de resistência também é mais acentuado nas amostras com maiores quantidades de cimento (C_i), indicando maior eficiência em teores mais elevados (8%-10%) do que em teores mais baixos (2%-4%). O ganho da resistência com a redução da porosidade pode ser explicado pelo fato de que uma maior superfície de contato entre partículas em solos cimentados proporciona também melhor cimentação dos materiais (Chang & Woods, 1992).

3.3 Efeito da Razão Porosidade/Teor de Cimento

Conforme constatado acima, as resistências dependem tanto da porosidade (η) quanto da quantidade de cimento (C_{iv}). Sendo estes dois termos fundamentais na determinação das resistências, propõe-se então que há uma relação entre eles, possibilitando assim estimar-se o comportamento mecânico do solo-cimento a partir da análise combinada destas duas variáveis: a razão vazios/teor de cimento (η/C_{iv}).

A relação q_u versus η/C_{iv} demonstra que o termo η/C_{iv} representa o efeito distinto das duas variáveis (η e C_{iv}) em um único fator. Isso significa que η e $1/C_{iv}$ governam separadamente q_u , e que o resultado do aumento da porosidade pode ser contraposto pelo aumento do teor volumétrico do cimento, resultando em η/C_{iv} determinando q_u . O mesmo é válido para q_t .

A partir desta premissa, é possível então que misturas com porosidades e teores de cimento distintos possam atingir resistências iguais, desde que possuam a mesma razão η/C_{iv} . Uma forma de tornar as taxas

de variação de η e $1/C_{iv}$ compatíveis é a aplicação de um expoente único em um dos termos. Neste trabalho, o expoente de 0,17 foi o que melhor representou o comportamento do solo-cimento estudado e foi aplicado no termo $1/C_{iv}$, para os resultados de tração e compressão.

Na Figura 6a é apresentada a resistência à compressão simples como função da razão vazios/cimento elevada ao expoente único, $\eta/(C_{iv})^{0,17}$. Esta razão pode ser também escrita em termos dos volumes de vazios (V_v), de cimento (V_c) e volume total (V_t) da amostra, como demonstra a Equação 1.

$$\frac{\eta}{C_{iv}} = \frac{\left(\frac{V_v}{V_t}\right)}{\left(\frac{V_c}{V_t}\right)} = \frac{V_v}{V_c} \quad (1)$$

Verifica-se que a diminuição da relação $\eta/(C_{iv})^{0,17}$ provoca o aumento da resistência. No gráfico apresentam-se todos os teores de cimento (C_{iv}) e pesos específicos (γ_d) que podem ser correlacionados com a resistência (q_u) em uma única curva de ajuste, do tipo potência, cujo coeficiente de correlação (R^2) é 0,94.

Na Figura 6b é apresentada a resistência à tração (q_t) como função da razão vazios/cimento. Observa-se que com a diminuição da relação $\eta/(C_{iv})^{0,17}$ há o acréscimo da resistência à tração das misturas, visto que isso representa simultaneamente, o aumento do teor de cimento e a redução da porosidade. No gráfico apresentam-se os teores de cimento (C_i) e pesos específicos (γ_d) que podem ser correlacionados com a resistência (q_t) em uma única curva potencial de ajuste cujo coeficiente de correlação (R^2) é 0,89.

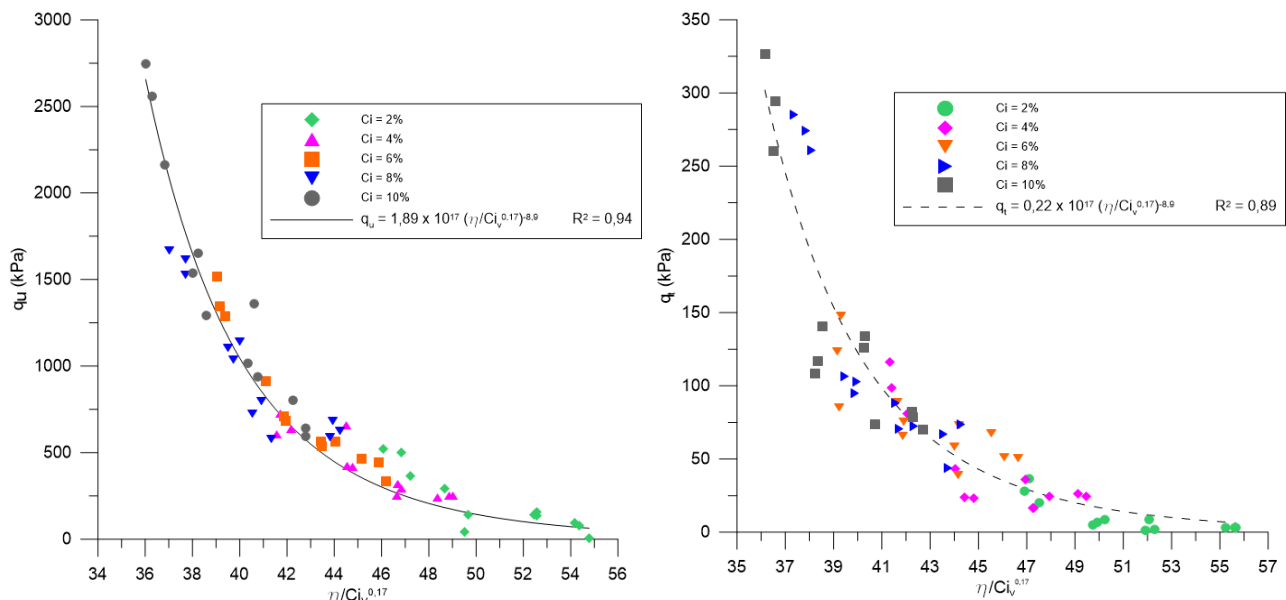


Figura 6. Efeito da relação vazios/cimento: a) Na resistência à compressão. b) Na resistência à tração.

3.4 Relação entre as Resistências à Compressão e à Tração

Analisando os gráficos das Figuras 6a e 6b em conjunto, verifica-se que q_u e q_t apresentam a mesma tendência. Ao dividir a equação obtida para q_t em função de $\eta/(C_{iv})^{0,17}$ pela equação obtida para q_u , que também é função de $\eta/(C_{iv})^{0,17}$, tem-se uma relação escalar q_t/q_u igual a 0,12 para as misturas de solo-cimento estudadas, sendo esta relação independente da porosidade, do teor de aglomerante e da razão vazios/cimento. A Equação 2 demonstra isso.

$$\frac{q_t}{q_u} = \frac{1,89 \times 10^{17} \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,17}} \right]^{-8,90}}{0,22 \times 10^{17} \left[\frac{\eta}{(C_{iv})^{0,17}} \right]^{-8,90}} = 0,12 \quad (2)$$



Desta forma, existe então uma proporção entre a resistência à tração e à compressão das misturas solo-cimento de 12%, que é válida para todas as porosidades e teores de cimento presentes neste estudo. Verifica-se que a relação calculada, q_t/q_u igual a 0,12, se assemelha com os valores obtidos por outros autores.

A areia cimentada, estudada por Consoli et al. (2009), mostrou uma relação q_t/q_u igual a 0,15. Esta relação não se mostrou dependente dos teores de cimento ou porosidade das misturas estudadas.

As misturas de solo-cal estudadas por Consoli et al. (2012), a partir de amostras de silte da região de Porto Alegre/RS, apresentaram uma relação q_t/q_u igual a 0,16. Este valor foi o mesmo para quaisquer valores de teor de cal e porosidade. Para Consoli et al. (2013a, 2013b, 2016), a relação entre as resistências à tração e à compressão, para misturas de areia da região de Porto Alegre/RS cimentada e reforçada com fibras de polipropileno, foi 0,14. Sendo este valor independente do teor de cimento e da porosidade das misturas.

Em estudo com compósitos de solo-cal-cinza, Consoli et al (2014) obteve uma relação escalar entre estas resistências igual a 0,19 para amostras de solo arenoso da região de Porto Alegre. Já para misturas de silte e cimento, Consoli et al (2017) concluiu que esta relação entre as resistências era de 0,13.

4 Considerações Finais

- A relação porosidade/teor volumétrico de cimento, η/C_{iv} , mostrou-se adequada para a avaliação da resistência das misturas. O ajuste da razão vazios/cimento, $\eta/(C_{iv})^{0,17}$, foi considerado apropriado para avaliar o comportamento do solo-cimento tanto na resistência à tração quanto à compressão. Ambas as resistências, q_t e q_u , aumentam com o aumento dos valores de C_{iv} , e reduzem com o aumento dos valores de η e de $\eta/(C_{iv})^{0,17}$.
- A relação vazios/aglomerante é eficiente como metodologia de dosagem não só para a realização de ensaios de laboratório, mas também possui grande valor no campo, pois permite que os engenheiros, durante o processo de estabilização de solos com baixa capacidade de suporte, tenham possibilidade de optarem por maior consumo de aglomerante ou por maior grau de compactação de solos de acordo com a disponibilidade financeira e técnica da obra em questão.
- O estudo observou que nas misturas solo-cimento a adição de cimento, mesmo em pequenas quantidades, provocou ganhos consideráveis na resistência do material. Para os teores estudados, as resistências à compressão simples e diametral cresceram linearmente com o aumento do teor de cimento. Além disso, a taxa do ganho de resistência, cresceu com a redução do índice de vazios, indicando que o reforço através do cimento é mais efetivo nas misturas mais compactadas.
- A redução da porosidade nas misturas acarretou em ganhos significativos nas resistências para ambos os tipos de ensaios. Observou-se que a resistência à compressão simples e à tração aumentou na forma linear com a redução da porosidade do solo-cimento.
- A relação entre as resistências, q_t/q_u , resultou no escalar 0,12 para as misturas solo-cimento avaliadas no estudo. Este valor mostrou-se independente da relação vazios/cimento. Como consequência, através do método de dosagem baseado nesta relação, é possível concentrar os ensaios tanto na compressão simples quanto na diametral, uma vez que eles podem ser correlacionados entre si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 7182 (2016). *Solo - Ensaio de Compactação*. São Paulo.
- ABNT NBR 16697 (2018). *Cimento Portland – Requisitos*. São Paulo.
- ASTM D2487-17e1 (2017). *Standard classification of soils for engineering purposes*. West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D1633-17 (2017). *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*. West Conshohocken, Pennsylvania.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia
Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- Chang, T. S.; Woods, R. D. (1992). Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 118, nº8, pp. 1216-1233.
- 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*, 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*, vol. 135, nº 9, pp. 1347-1353.
- Consoli, N. C.; Dalla Rosa, A.; Gauer, E. A.; dos Santos, V. R.; Moretto, R. L.; Corte, M. B. (2012). Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures. *Géotechnique Letters*, United Kingdom, vol. 2, nº 3, pp. 81-85.
- Consoli, N. C.; Moraes, R. R.; Festugato, L. (2013a). Parameters controlling tensile and compressive strength of fiber-reinforced cemented soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, nº 5, pp. 1568-1573.
- Consoli, N. C.; Moraes, R. R.; Festugato, L. (2013b). Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils. *Proceedings of the ICE - Ground Improvement*, vol. 166, nº 4, pp. 221-232.
- Consoli, N. C.; Rocha, C. G.; Silvani, C. (2014). Effect of curing temperature on strength of sand-coal fly ash-lime blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE.
- Consoli, N. C.; Samaniego, R. A. Q.; Marques, S. F. V.; Venson, G. I.; Pasche, E.; Velásquez, L. E. G. (2016). A single model establishing strength of dispersive clay treated with distinct binders. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.53(12), pp. 2072-2079
- Consoli, N. C.; Quiñónez, R. A.; González, L. E.; López, R. A. (2017). Influence of molding moisture content and porosity/cement index on stiffness, strength, and failure envelopes of artificially cemented fine-grained soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE.
- Diambra, A.; Ibraim, E.; Peccin, A.; Consoli, N. C.; Festugato, L. (2017). Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
- Moore, R. K., Kennedy, T. W., and Hudson, W. R. (1970). "Factors affecting the tensile strength of cement-treated materials." *Highway Research Record: Soil Stabilization: Multiple Aspects*, Washington, D.C., HRB, 315, 64-80.