

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/584

Análise dos Comportamentos Físico-químico e Mecânico de Areias de Dunas Melhoradas com Cimento Portland

Douglas Domingues Kaípo
Engenheiro Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, douglasdomingues1712@gmail.com

Naloan Coutinho Sampa
Professor, UFSC, Florianópolis, Brasil, naloan.sampa@ufsc.br

Humberto Cosmos Ferreira de Sales Silveiro da Silva Volpato
Graduando em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil, humberto.cosmos@grad.ufsc.br

RESUMO: O artigo estudou os principais comportamentos físico-químicos e mecânicos de uma mistura de areia e cimento. Os ensaios realizados abrangem granulometria, massa específica, limites de Atterberg, pH, Fluorescência de Raios-X, Difração de Raios-X, além dos ensaios de resistência à compressão simples e diametral. A influência do tempo de cura, teor de cimento e peso específico seco na resistência mecânica das misturas foi analisada. Os resultados indicam uma melhoria na resistência mecânica com o aumento das variáveis investigadas, em consonância com pesquisas anteriores. Várias expressões foram propostas como metodologia de dosagem, relacionando as resistências à compressão simples e diametral com a razão entre porosidade e teor volumétrico de cimento. Os resultados deste estudo servirão como base para pesquisas em andamento e futuras sobre o comportamento de areias de dunas de Florianópolis melhoradas com adição de diferentes agentes cimentantes, visando à proteção das dunas e à redução do impacto da erosão costeira.

PALAVRAS-CHAVE: Cimento Portland, Areia, Resistência à Compressão Simples, , Resistência à Compressão Diametral, Melhoramento dos Solos.

ABSTRACT: The paper investigated the main physicochemical and mechanical behaviors of a mixture of sand and cement. The conducted tests cover particle size distribution, specific gravity, Atterberg limits, pH, X-ray Fluorescence, X-ray Diffraction, as well as the unconfined compression and splitting tensile tests. The influence of curing time, cement content, and dry specific weight on the mechanical strength of the mixtures was analyzed. The results indicate an improvement in mechanical strength with the increase of the investigated variables, in line with previous research. Several expressions were proposed as dosing methodology, relating unconfined compression and splitting tensile strengths with the ratio between porosity and volumetric cement content. The findings of this study will serve as basis for ongoing and future research on the behavior of Florianópolis dune sands enhanced with the addition of different cementitious agents, aiming at dune protection and reducing the impact of coastal erosion.

KEYWORDS: Portland Cement, Sand, Unconfined Compression Strength, Splitting Tensile Strength, Soil Improvement.

1 INTRODUÇÃO

Os solos são amplamente utilizados na engenharia como suporte para fundações e materiais de construção, devido à sua abundância na natureza e baixo custo. No entanto, os solos classificados como moles, expansíveis, fofos, colapsáveis, orgânicos, entre outros considerados problemáticos, podem apresentar desafios para a implantação e bom desempenho de obras de engenharia.

Para lidar com essas limitações, é comum recorrer à remoção parcial ou total do solo, ajustes nos projetos ou melhoramento das propriedades do solo para atender aos requisitos do projeto (Cristelo, 2001).

Várias técnicas são empregadas para o melhoramento dos solos, incluindo a estabilização por processos físico-químicos. Essa técnica envolve a adição de agentes cimentantes como cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, entre outros, ao solo, promovendo reações químicas ou interações

físicas que melhoram uma ou mais propriedades do solo natural. Dentre esses agentes cimentantes, o cimento Portland e a cal são os mais utilizados.

Diversos autores investigaram as principais reações que ocorrem em uma mistura solo-cimento-água, incluindo Herzog e Mitchel (1963), Moh (1965), Ingles e Metcalf (1972), Bergado et al. (1996), Mindess et al. (2003). Currin et al. (1976) e a NBR 11798:2012 identificaram solos suscetíveis à estabilização com cimento com base nos resultados das análises granulométricas e dos limites de Atterberg, enquanto a NBR 12253:2012 recomenda proporções de cimento para a estabilização de vários tipos de solo. Por outro lado, Croft (1967), Kosmatka et al. (2002), PCA (2002), e a NBR 12253:2012 discutem a dosagem da mistura solo-cimento e a resistência à compressão simples (q_u) mínima necessária para considerar essas misturas como estabilizadas.

Vários métodos racionais de dosagem foram propostos por diferentes autores, como Larnach (1960), Kézdi (1979), Foppa (2005), Diambra et al. (2017), Consoli et al. (2017a), Consoli et al. (2017b), e Consoli et al. (2018). Esses métodos visam relacionar a resistência à compressão simples (q_u) ou outros comportamentos com parâmetros como volume absoluto de vazios ((V_v)), volume absoluto de cimento (V_c), porosidade (η) ou teor volumétrico de cimento (C_{iv}). Por exemplo, as Equações 1 e 2 foram propostas por Foppa (2005) e Diambra et al. (2017), respectivamente, para relacionar q_u do solo melhorado com a razão entre a η e o C_{iv} . Esses autores também apresentam a expressão para o cálculo da η e do C_{iv} e discutem o significado dos expoentes k e B .

$$q_u = A \left(\frac{\eta}{C_{iv}^k} \right) \quad (1)$$

$$q_u = A \left(\frac{\eta}{C_{iv}^k} \right)^{-B} \quad (2)$$

Dada a heterogeneidade dos solos, é necessário realizar estudos mais aprofundados sobre os comportamentos dos solos regionais para evitar erros de extrapolação. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento das areias das dunas de Florianópolis e estabelecer métodos racionais de dosagem de sua mistura com cimento, considerando diferentes tempos de cura e densidades.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A areia utilizada neste estudo foi coletada de uma duna em Florianópolis, sul do Brasil. Foi lavada com água, peneirada com uma peneira de 2,0 mm e secada em estufa a 50°C até constância de umidade.

A Figura 1 mostra as curvas granulométrica do solo obtidas por peneiramento e difração a laser. Ambas indicam uma predominância de partículas do tamanho de areia (>88%). O solo é classificado como areia silto-arenosa não-plástica, uniforme a mal graduada (SP-SM com $C_u < 5$) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS). A Tabela 1 resume as principais propriedades físicas da areia, enquanto a Tabela 2 apresenta resultados da análise de Espectrometria de Fluorescência de Raio X – FRX, com destaque do quartzo (SiO_2).

O cimento Portland CP V-ARI utilizado no estudo é um cimento de alta resistência inicial conhecido por sua alta reatividade em pouco tempo. O rápido desenvolvimento de resistência facilitou a seleção de tempos de cura de 7 dias e 28 dias. A curva granulométrica do cimento é ilustrada na Figura 2, onde se observa predominância de partículas finas cuja densidade real dos grãos é de 3,13. As principais propriedades químicas e físicas são mostradas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

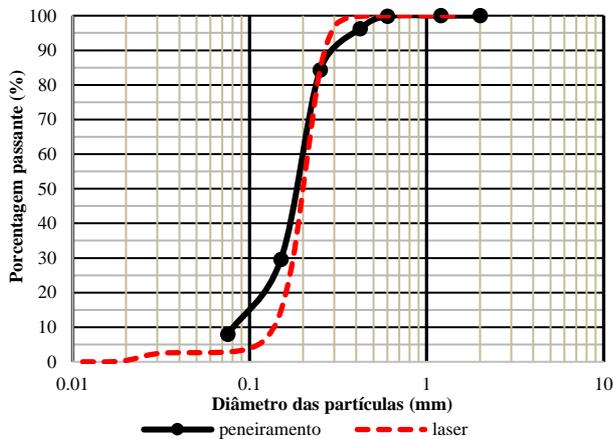


Figura 1. Curva granulométricas do solo.

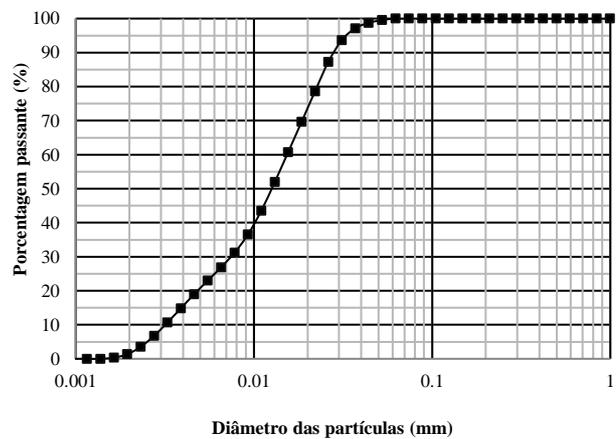


Figura 2. Curva granulométrica do cimento Portland.

Os espectros de difração de raios-X (DR-X) da areia e do cimento, além das propriedades físicas e mecânicas do cimento CP-V, podem ser encontrados em Domingues (2023). Os resultados de DR-X indicam presença de óxido de cálcio (CaO), que é essencial para ocorrência da reações pozolânicas e aumentar significativamente a resistência de misturas de solo-cimento. Os resultados de fluorescência de raios-X (FR-X) apresentados na Figura 2 mostram uma concentração de mais de 73% de CaO no cimento, corroborando os resultados da FR-X.

Tabela 1.1 Propriedades físicas da areia.

Propriedades	Areia
Limite de Liquidez (%)	-
Limite de Plasticidade (%)	-
Índice de Plasticidade (%)	Não plástico
Massa especif. dos grãos (g/cm ³)	2,65
% Areia Grossa	0,0
% Areia Média	3,76
% Areia Fina	88,31
% Argila e Silte	7,93
Diâmetro D ₁₀ (mm)	0,08
Diâmetro D ₃₀ (mm)	0,16
Diâmetro D ₆₀ (mm)	0,20
Coefficiente de Uniformidade (C _U)	2,50
Coefficiente de Curvatura (C _C)	1,60
Peso unitário seco máximo para a energia intermediária de Proctor (kN/m ³).	16,35
Teor de umidade ótimo para energia intermediária de Proctor (%).	16,9
Classificação SUCS	SP-SM
Classificação AASHTO	A-3 (0)

Tabela 2. Porcentagem de óxidos de átomos dos elementos químicos – ensaio FR-X.

Areia		Cimento CP-V	
Analito (óxidos)	%	Analito (óxidos)	%
SiO ₂	92,74	CaO	73,037
Al ₂ O ₃	3,044	SiO ₂	17,102
CaO	1,673	SO ₃	4,529
K ₂ O	1,542	Fe ₂ O ₃	3,302
Fe ₂ O ₃	0,568	K ₂ O	1,200
TiO ₂	0,169	SrO	0,342
SO ₃	0,145	TiO ₂	0,342
Sm ₂ O ₃	0,039	MnO	0,047
MnO	0,024	V ₂ O ₅	0,027
CuO	0,018	CuO	0,026
ZrO ₂	0,009	Cr ₂ O ₃	0,021
Au ₂ O	0,008	ZnO	0,018
SrO	0,005	Rb ₂ O	0,007
Rb ₂ O	0,005	NiO	0,001

2.2 Métodos

2.2.1 Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova (CPs), com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, foram utilizados nos ensaios de compressão simples e diametral. A moldagem dos CPs começou com a pesagem de areia, cimento e água. Em seguida, areia e cimento foram misturados manualmente para obter uma mistura homogênea. A água foi gradualmente adicionada para hidratar uniformemente todas as partículas do solo-cimento. Após a mistura, o

material de cada camadas foi pesado e armazenado em recipiente fechado para evitar perda de umidade. O material remanescente foi colocado em duas cápsulas para determinação de umidade.

A compactação foi realizada por meio de acionamento manual de um macaco hidráulico, que empurrava verticalmente o molde tripartido contendo solo-cimento contra um pistão de 5 mm de diâmetro preso a uma estrutura metálica. O processo continuou até alcançar 3,3 cm de espessura para cada camada e a densidade seca especificada. Antes da compactação, as partes do molde foram lubrificadas, unidas e fixadas à base do molde. As superfícies da primeira e da segunda camada foram levemente escarificadas antes de adicionar o material da próxima camada. O CP foi retirado do molde imediatamente após a compactação, e seu peso e dimensões (diâmetro e altura) foram medidos com precisão de 0,01 g e 0,1 mm, respectivamente. Três CPs foram moldados para cada combinação de mistura para antecipar a dispersão esperada dos resultados.

Os pesos específicos secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³ e a umidade de 16,8% considerados nos ensaios com tempo de cura de 7 dias, foram determinados por meio do ensaio de compactação Proctor intermediário. Para o tempo de cura de 28 dias, os CPs foram moldados com o mesmo teor de umidade, mas com peso específico seco de 16 kN/m³ e teor de cimento de 5%. Os teores de cimento em relação à massa seca da areia foram determinados com base nos valores de pH medidos de acordo com ASTM D6276/2019, usando um medidor de pH portátil DIGIMED DM-20P com faixa de medição de -2 a 20. O pH do cimento puro é de 12,14, enquanto o pH do solo com teores de cimento de 3%, 5% e 7% varia entre 9,5 e 12,11.

A preparação dos CPs, incluindo a mistura, a compactação, o acondicionamento e o armazenamento na câmara úmida, levou menos de uma hora. Esse tempo é inferior ao tempo de pega inicial do cimento, que é de 2 horas e 37 minutos.

2.2.2 Ensaios de Compressão Simples e Diametral

Após o sexto dia de cura (ou vigésimo sétimo dia) dos CPs na câmara úmida, eles foram imersos ainda em um tanque de água por 24 h para minimizar o efeito da sucção. Antes dos ensaios de compressão, eles foram removidos do tanque e superficialmente secos com papel-toalha. Em seguida, um CP foi posicionado verticalmente (ou horizontalmente no ensaio de compressão diametral) no centro da prensa de compressão, com capacidade de 50 kN. Após os ajustes necessários, o CP foi comprimido até a ruptura a uma taxa constante de 1,14 mm/min. Um relógio comparador fixo ao anel dinamométrico de 10 kN e resolução de 0,005 kN foi utilizado para medir os deslocamentos, que foram posteriormente convertidos em cargas.

Um total de 90 corpos de prova (72 com tempo de cura de 7 dias e 18 com tempo de cura de 28 dias) foram considerados válidos e testados, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de ensaios realizados.

Mistura	Ensaio	Tempo de cura	Quantidade (un.)
Solo - Cimento	Compressão Simples (CS)		36
	Compressão (CD)	Diametral 7 dias	36
	Compressão Simples (CS)		9
	Compressão (CD)	Diametral 28 dias	9
Total			90

3 RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 mostram a variação da resistência à compressão simples (q_u) e à compressão diametral (q_t) em função do teor de cimento (CP) para diferentes pesos específicos secos. Por sua vez, as Figuras 5 e 6 demonstram a variação de q_u e q_t em função do peso específico seco para diferentes teores de cimento (CP). Todas as figuras referem-se a um tempo de cura de 7 dias.

Os valores de q_u e q_t aumentaram de forma não linear com o aumento tanto do teor de cimento quanto do peso específico seco. A influência do peso específico seco nos valores de q_u e q_t está relacionada à redução dos vazios e ao maior entrosamento entre as partículas devido à densificação. Já a influência do teor

de cimento nos valores de q_u e q_t está associada à maior disponibilidade de CaO para as reações pozolânicas responsáveis pelo aumento da resistência.

Por exemplo, com um teor de cimento de 7%, os valores de q_u são 306 kPa, 436 kPa e 863 kPa para pesos específicos secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, respectivamente. Considerando um peso específico seco de 16 kN/m³, os valores de q_u são iguais a 10,6 kPa, 165 kPa, 451 kPa e 863 kPa para os teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%, respectivamente. Para um teor de cimento de 7%, os valores de q_t são 52,8 kPa, 56,5 kPa e 71,4 kPa para pesos específicos secos de 14 kN/m³, 15 kN/m³ e 16 kN/m³, respectivamente. Considerando um peso específico seco de 16 kN/m³, observa-se que os valores de q_t são iguais a 20 kPa, 19 kPa, 48,8 kPa e 71,4 kPa para teores de cimento de 0%, 3%, 5% e 7%, respectivamente. Os valores de q_u e q_t aos 7 dias são inferiores aos 2,1 MPa recomendados por PCA (2002) e NBR 12253/2012 para solos estabilizados com cimento, indicando a necessidade de tempos de cura mais longos ou teores de cimento mais elevados para atender aos critérios de estabilidade.

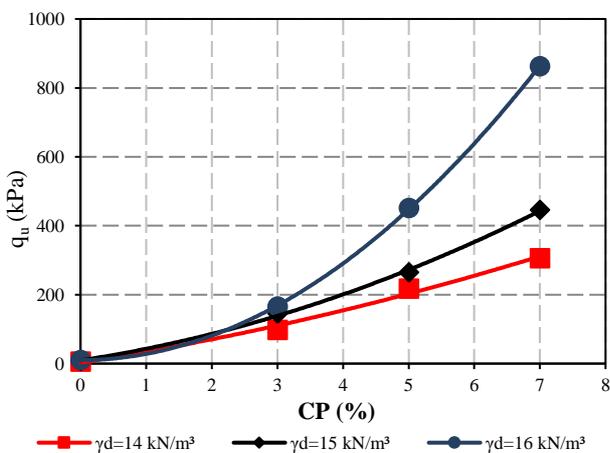


Figura 3. q_u versus CP - tempo de cura de 7 dias.

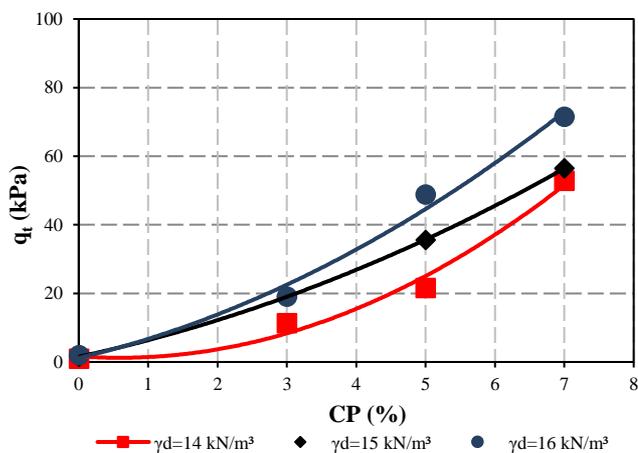


Figura 4. q_t versus CP - tempo de cura de 7 dias.

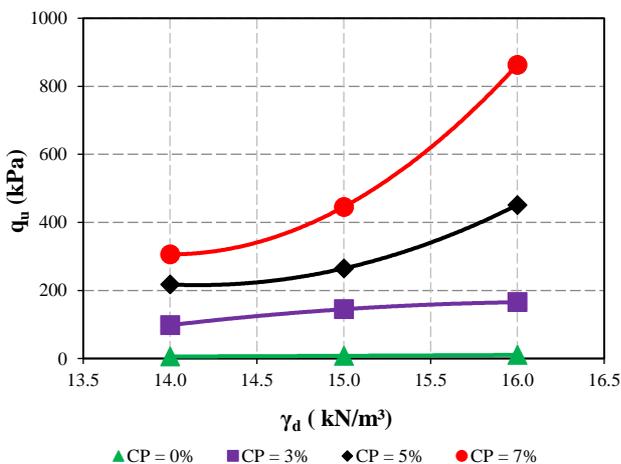


Figura 5. q_u versus γ_d - tempo de cura de 7 dias.

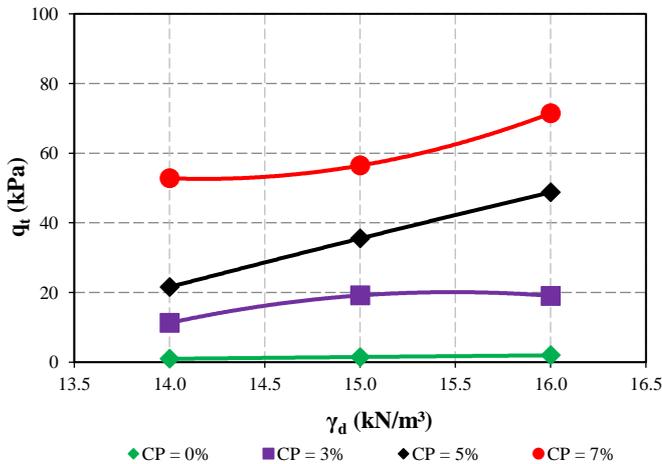


Figura 6. q_t versus γ_d - tempo de cura de 7 dias.

As Figuras 6 e 7 demonstram a influência do tempo de cura nos valores de q_u e q_t , respectivamente. Como era esperado, os valores de q_u e q_t aos 28 dias são superiores aos de 7 dias devido às reações pozolânicas que continuam ocorrer ao longo do tempo. As resistências à compressão simples e diametral aumentam de forma não linear com o teor de cimento em ambos os tempos de cura.

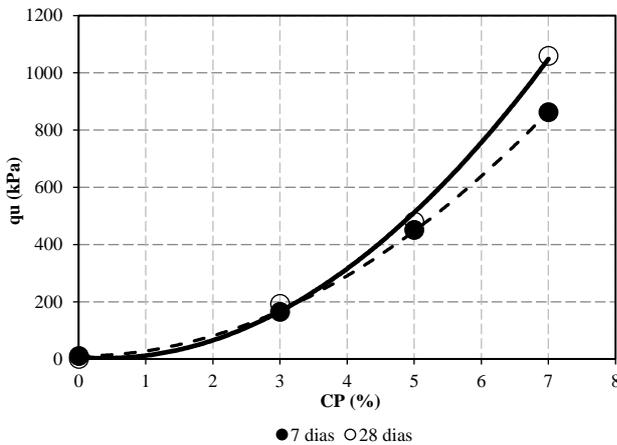


Figura 6. q_u versus CP – tempos de cura de 7 e 28 dias.

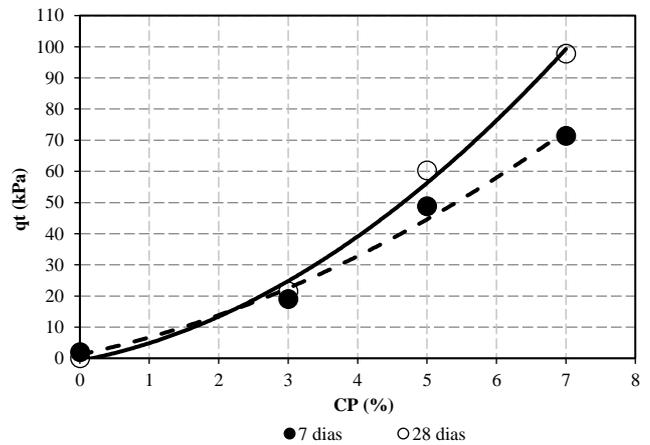


Figura 7. q_t versus CP – tempos de cura de 7 e 28 dias.

As Figuras 8 e 9 apresentam a razão q_t/q_u para tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Na Figura 8, a razão varia entre 8,28% e 18,87% para diferentes teores de cimento e pesos específicos. As médias da razão q_t/q_u são de 18,1% para 0% de cimento, 12,1% para 3%, 11,4% para 5% e 12,7% para 7%.

Na Figura 9, com 28 dias de cura, a razão q_t/q_u varia entre 9,23% e 12,56%. Os valores das razões q_t/q_u em ambos os tempos de cura estão dentro da faixa de 10% a 20% encontrada na literatura para solos estabilizados com cimento.

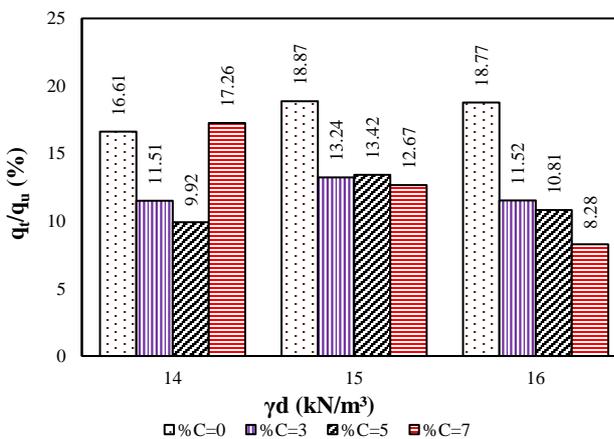


Figura 8. q_t/q_u versus γ_d – 7 dias.

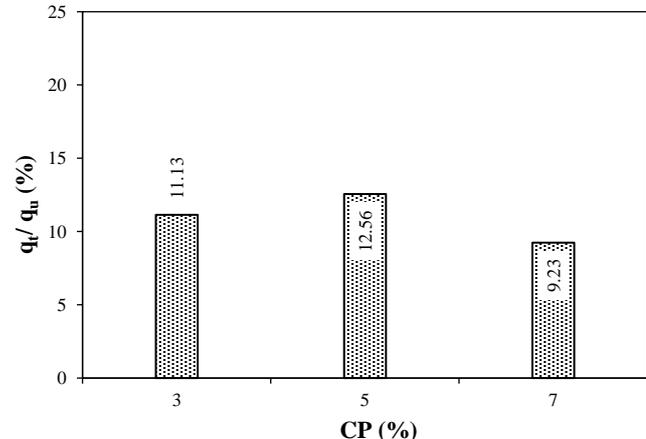


Figura 9 - q_t/q_u versus CP - 28 dias.

As Figuras 10 a 13 ilustram a variação das resistências à compressão em função da razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{IV}). Todas as figuras indicam uma redução de q_u ou q_t com o aumento da razão η/C_{IV} , e ainda mostram uma forte correlação entre q_u ou q_t com a razão η/C_{IV} , conforme evidenciado por valores de R^2 superiores a 0,92.

Os coeficientes k nas relações de q_u são 0,29 e 0,95 para tempos de cura de 7 e 28 dias, respectivamente. Nas relações de q_t , os valores de k são 1,04 e 1,22 para os mesmos tempos de cura. Coeficientes k menores que 1 indicam uma influência maior da porosidade do que do teor de cimento, enquanto valores superiores a 1 sugerem o contrário.

Conforme discutido anteriormente, essas normalizações servem como métodos racionais de dosagem, permitindo uma estimativa rápida dos valores de q_u ou q_t com base na porosidade (η) e no teor volumétrico de cimento (C_{IV}).

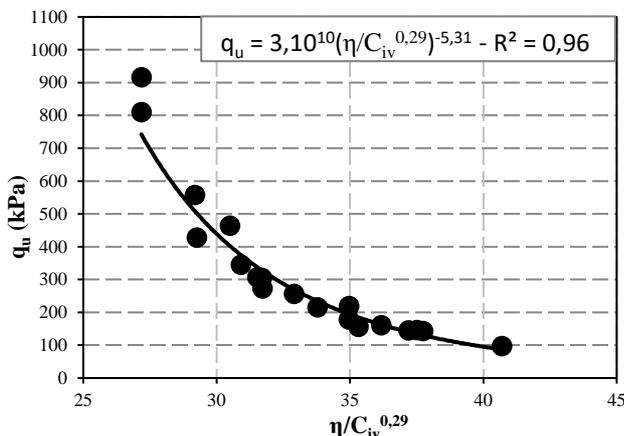


Figura 10. q_u versus η/C_{iv} - 7 dias.

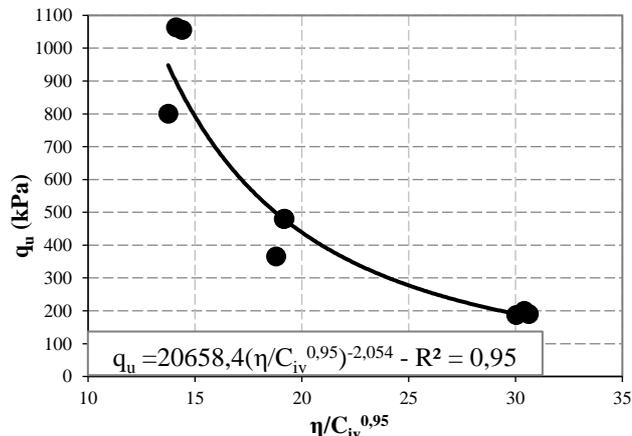


Figura 11. q_u versus η/C_{iv} - 28 dias.

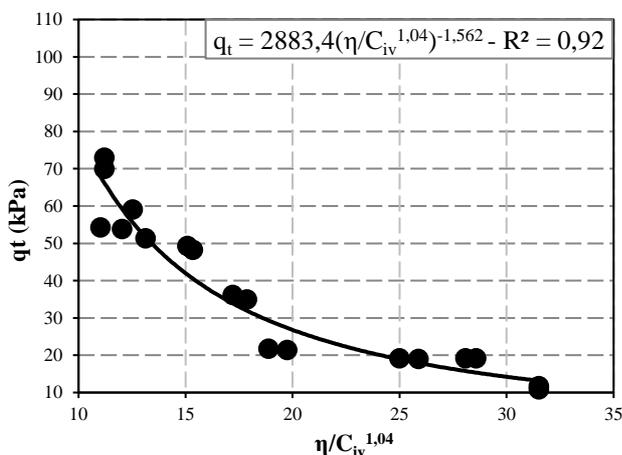


Figura 12. q_t versus η/C_{iv} - 7 dias.

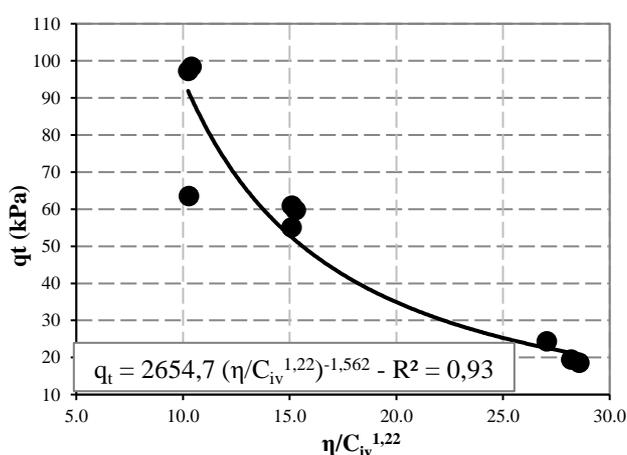


Figura 13. q_t versus η/C_{iv} - 28 dias.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar os comportamentos físico-mecânicos de um solo arenoso melhorado com cimento Portland e estabelecer métodos racionais de dosagem. A partir dos resultados obtidos, são apresentadas as seguintes conclusões:

- o solo em estudo é predominantemente arenoso, composto por partículas de quartzo, sendo classificado como não plástico, uniforme a mal graduado. Seu peso específico seco máximo e a umidade ótima são iguais a 16,35 kN/m³ e 16,8 %, respectivamente;
- o pH do solo sem a adição de agente cimentante é de 9,53. Com a adição de teores de cimento entre 3% e 7%, observa-se um aumento substancial, variando de 11,94 a 12,14;
- as análises químicas por meio de DR-X e FR-X indicam a predominância de quartzo (SiO₂) na areia e de óxido de cálcio (CaO) no cimento;
- As resistências à compressão simples (q_u) e compressão diametral (q_t) aumentam consideravelmente com o aumento do teor de cimento, do peso específico seco e do tempo de cura. Contudo, para todas as combinações de mistura, os valores de q_u são inferiores à 2,1 MPa recomendados para solos estabilizados;
- os valores da razão q_t/q_u estão dentro da faixa de 10% a 20% apresentada na literatura para solos estabilizados com cimento;
- expressões propostas para estimar as resistências a partir da razão entre a porosidade (η) e o teor volumétrico de cimento (C_{iv}) demonstram boas correlações e podem ser utilizadas como métodos racionais de dosagem para misturas similares;

- para futuras pesquisas, recomenda-se realizar análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para entender a evolução da cimentação ao longo do tempo. Além disso, deve-se investigar o comportamento das misturas solo-cimento sob temperaturas mais altas e tempos de cura mais longos, bem como avaliar a durabilidade das misturas..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). NBR 12131. *Estacas- Prova de carga estática: método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11798 (2012) *Materiais para base de solo-cimento – Requisitos*.
- _____. NBR 12253 (2012) *Solo-cimento – Dosagem para eprego como camada de pavimento – Procedimento*.
- Bergado, D.T., Anderson, L.R., Muira, N., Balasubramaniam, A.S. (1996) *Soft ground improvement*. In: Lowland and Other Environments. New Work: American Society of Civil Engineers.
- Consoli, N.C., Da Silva, A.P., Nierwinski, H. P., Sosnoski, J. (2017a) Durability, strength and stiffness of compacted gold tailings-cement mixes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 55(10), p. 486-494.
- Consoli, N.C., Da Silva, J.K., Scheuermann Filho, H.C., Rivoire, A.B. (2017b) Compacted clay-industrial wastes blends: long term performance under extreme freeze-thaw and wet-dry conditions. *Applied Clay Science*, v. 146, p. 404-410.
- Consoli, N.C., Winter, D., Leon, H.N., Scheuermann Filho, H.C. (2018) Durability, strength and stiffness of green stabilized sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 144(9), p. 1-10.
- Cristelo, N. (2021) *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Croft, J.B. (1967) The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization. *Geotechnique*, v. 17(2), p. 119-135.
- Currin, D.D., Allen, J.J., Little, D.N. (1976) Validation of soil stabilization index system with manual development, *Transportation Research Board*. Technical Report No. FJSRL-TR-76-0006.
- Diambra, A., Ibraim, E., Consoli, N.C., Festugato, L. (2017) Theoretical derivation of artificially cemented granular soil strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 143(5), p. 1-9.
- Foppa, D. (2005) *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC, UFSC, Porto Alegre.
- Herzog, A., Mitchell, J.K. (1963) Reactions accompanying stabilization of clay with cement. *Highway Research Record*, v. 36, p. 146-171.
- Domingues, D.K. (2023) *Análise do Comportamento Mecânico de uma Areia Estabilizada com Ligantes Convencionais e Sustentáveis*. Trabalho de Conclusão do Curso – Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003) *Concrete*. New Jersey: Pearson Education.
- Kezdi A. (1979) *Stabilized earth roads development in geotechnical engineering*. Elsevier, London
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. (2002) *Design and control of concrete mixtures*. EB001. Portland Cement Association PCA. 14. Illinois: Skokie, 372 p.
- Larnach, W.J. (1960) *Relationship between dry density, voids/cement ratio and strength of soil-cement mixtures*. Civil Engineering and Public Works Reviews. London: Lomax Erskine and Co., v.55(648), p. 903-905.
- Moh, Z.C. (1965) Reactions of Soil Minerals with Cement and Chemicals. *Highway Research Record*, Washington, O. C. v. 6a: p. 39-61.
- Ingles, O.G., Metcalf, J.B. (1972) *Soil stabilization: principle and practice*. Melbourne: Butterworths.