

Parâmetros de resistência e de durabilidade de um silte sedimentar cimentado para aplicação em pavimentação

Strength and durability parameters of a cemented sedimentary silt for application in paving

Jair de Jesús Arrieta Baldovino¹, Ronaldo Luis dos Santos Izzo², Juliana Lundgren Rose³,
Érico Rafael da Silva⁴

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná – Brasil, jair.arrieta@outlook.com

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná – Brasil, izzo@utfpr.edu.br

³Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná – Brasil, julrose@gmail.com

⁴Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná – Brasil, herico.rafael@gmail.com

Recebido:

27 de junho de 2019

Aceito para publicação:

7 de abril de 2020

Publicado:

15 de dezembro de 2020

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chaves:

Solo-cimento.

Durabilidade.

Resistência mecânica.

Formação Guabirotuba.

Pavimentação.

Keywords:

Soil-cement.

Durability.

Strength.

Guabirotuba Formation.

Paving.

DOI:10.14295/transportes.v28i5.2106

RESUMO

Este artigo apresenta os parâmetros de resistência e de durabilidade de um silte sedimentar de Curitiba (Brasil) estabilizado com cimento para potencial uso em pavimentação. A resistência à tração por compressão diametral, a resistência à compressão simples e perda de massa devido a ciclos de molhagem e secagem (M/S) foram pesquisados em laboratório usando um silte de coloração cinza esverdeado (originário de um dos horizontes da Formação Guabirotuba - Paraná) e cimento de alta resistência inicial-ARI (CPV). Foram empregados teores de cimento (C) de 3, 5, 7 e 9%, pesos específicos secos de moldagem (γ_d) de 14, 15 e 16 kN/m³, tempos de cura (t) de 7, 14 e 28 dias, e um teor de umidade (ω) fixo de 23%. Os resultados demonstram que com o aumento do teor de cimento e do tempo de cura, há um ganho de resistência mecânica, melhoramento na microestrutura, e uma diminuição na perda acumulada de massa (PAM) e da porosidade inicial (η) das misturas compactadas. Empregou-se a relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}) para determinar a quantidade de cimento mínima necessária para estabilizar o solo de acordo com os parâmetros de resistência e durabilidade. Finalmente, C=5%, em peso, é o teor mínimo que satisfaz os requerimentos para uso potencial do solo em sub-base.

ABSTRACT

This paper presents the strength and durability parameters of sedimentary silt from Curitiba (Brazil) stabilized with cement for potential use in paving. Splitting tensile strength, unconfined compressive strength and loss of mass against wetting and drying cycles (W/D) were researched in the laboratory using greenish-gray silt (originating from one of the horizons of the Guabirotuba Formation - Paraná) and high-early strength Portland cement-ARI (CPV). Cement contents (C) of 3, 5, 7 and 9% were used, molding dry unit weights (γ_d) of 14, 15 and 16 kN/m³, curing times (t) of 7, 14 and 28 days, and fixed moisture content (ω) of 23%. The results demonstrate that with the increase of the cement content and the curing time, there is a gain of strength, microstructure improvement, and a decrease in the accumulated mass loss (ALM) and the initial porosity (η) of the compacted mixtures. The porosity/volumetric cement content ratio (η/C_{iv}) was used to determine the minimum amount of cement necessary to stabilize the soil according to the parameters of strength and durability. Finally, C=5% by weight is the minimum content that satisfies the requirements for potential soil use in the sub-base.



1. INTRODUÇÃO

Os solos da região metropolitana de Curitiba (Paraná/Brasil), em sua maioria, são de origem sedimentar e expansivos (Baldovino 2018; Kormann 2002). Recentes estudos têm buscado estabilizar estes solos para sua aplicação, principalmente, na pavimentação. Dentre os estudos, destacam-se a estabilização com cal hidratada (Baldovino et al. 2018a; 2018b), com cimento pozolânico (Moreira et al. 2019) e com cimento de alta resistência e baixa temperatura inicial de cura (Baldovino et al. 2019).

Na Figura 1, pode-se apreciar a vista geral de um talude rodoviário na cidade de Curitiba. As primeiras camadas da Formação Guabirota são compostas por diferentes tipos de solos, principalmente argilas e siltes expansivos (Kormann, 2002). A principal característica entre as camadas é a coloração. Estas diferentes colorações podem estar em um mesmo perfil ou separadamente. Assim, são observadas quatro cores principais: vermelha, rosa, amarela e cinza.

A camada vermelha pode ser encontrada em profundidades de até 5 m, bem como, a amarela e a rosa. Já a camada cinza pode chegar até 50 m de profundidade. No entanto, sendo a camada com maior volume dentro do perfil Guabirota, carece de maiores estudos de estabilização dos solos característicos desta camada. Deste modo, este artigo tem por objetivo estabilizar um solo cinza com adição de cimento Portland, e estudar a sua resistência e durabilidade para seu potencial uso em pavimentação.

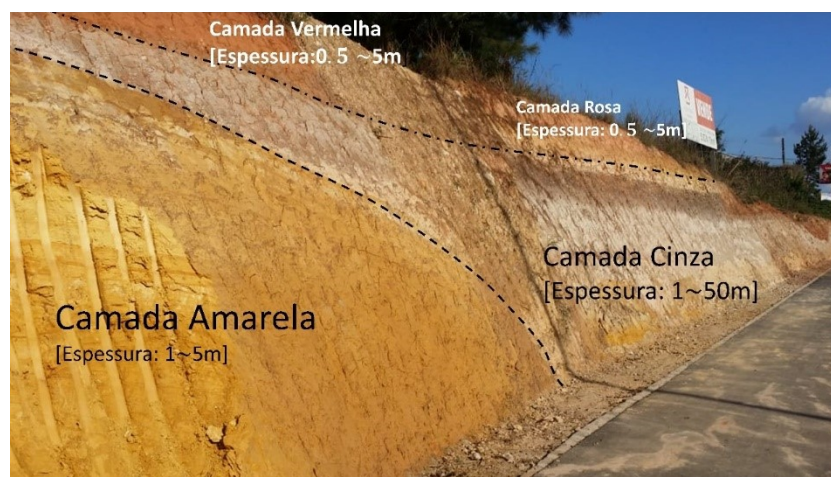


Figura 1. Seção típica de um talude da Formação Guabirota (região metropolitana de Curitiba)

2. REVISÃO DA LITERATURA

Por vezes, em processos que antecedem obras civis, o solo local pode ser considerado impróprio, tanto para execução de fundações, quanto para construção de pavimentos, ferrovias ou aterros, o que acaba inviabilizando o projeto, seja por problemas de ordem técnica ou econômica. Assim sendo, o melhoramento de solos tornou-se uma técnica capaz de viabilizar a utilização deste material, ou da área em que ele se encontra, diminuindo o emprego de tecnologias complexas ou até mesmo sua substituição. O processo de estabilização de solos é considerado como sendo a alteração de uma ou mais de suas propriedades físico-químicas a fim de garantir melhorias às suas propriedades de resistência, durabilidade e deformação. No entanto, ao alterar tais parâmetros, é importante que sejam consideradas mudanças de outras propriedades

durante o processo de estabilização, oriundas dos efeitos do teor de água, permeabilidade, grau de saturação, dentre outros.

A adição de cimento ao solo é uma técnica bastante relevante quando se trata de estabilização de solos problemáticos. Por ela, é possível a construção de estruturas em solos moles e, também, a utilização deste material como base de pavimentos rodoviários e ferrovias (Sirivitmaitrie et al., 2011; Forcelini et al., 2016). Bunawan et al. (2018) destacam que a estabilização de superfície pelos métodos de mistura profunda (*deep mixing*) ou aterro leve, são algumas das técnicas desenvolvidas capazes de permitir a construção sobre solos moles, e levar melhorias às propriedades mecânicas desses solos, além de serem considerados econômicas e eficazes. O *deep mixing* são colunas semirrígidas confeccionadas a partir da mistura de solo com um determinado aglomerante (cimento ou cal). No método úmido, o ligante misturado com água é injetado no solo através da ferramenta giratória, que promove a homogeneização do solo com a nata. O sucesso destes métodos ocorre devido às propriedades aglutinantes do cimento que quando agregado ao solo contribui, significativamente, para ganho de resistência, redução da permeabilidade e compressibilidade (Chen et al., 2018). O método de mistura *deep mixing* foi desenvolvido, originalmente, na Suécia e no Japão. Em meados dos anos 70, foi utilizado na Suécia apenas para misturas com cal, e, posteriormente, com cimento e outros materiais. O *deep mixing* é tema de estudo em diversos países, tais como China (Fan et al., 2018), Tailândia e Austrália (Horpibulsuk et al., 2010; Yaghoubi et al., 2019), Malásia (Bunawan et al., 2018), e Egito (Farouk e shahien, 2013).

O uso do cimento Portland é recomendado para a estabilização de qualquer tipo de solo, com exceção dos altamente orgânicos. Conforme Ghadir e Ranjbar (2018), o uso deste material na estabilização de solos garante aumentos de resistência e durabilidade, e a diminuição da compressibilidade. O emprego de solos estabilizados com cimento é comum em bases e subleitos de pavimento. Devido a sua fragilidade a trincas, é rara sua utilização como material de revestimento, por exemplo. O teor de cimento da mistura é uma variável importante a ser analisada. Em colunas de solo-cimento, objeto de estudo de Horpibulsuk et al. (2012), o comportamento de consolidação da mistura apresentou melhorias na capacidade de carga do solo e baixa tensão em solos reforçados com maiores teores de cimento. Resultados de modelos físico e numérico reportaram que, em longas colunas de solo-cimento, a variação da pressão nos poros ao redor da drenagem é considerada insignificante. Adicionalmente, a resistência de solos estabilizados com cimento varia inversamente com o teor de água, ou seja, à medida que o teor água-cimento aumenta, ocorre a diminuição da resistência a compressão do solo misturado.

Na pesquisa de Yaghoubi et al. (2019), uma argila marinha foi estabilizada com diferentes percentuais de cinzas volantes e escórias, um ganho de resistência notório foi observado quando o percentual deste material passou de 10% para 20%. Com relação ao módulo de elasticidade, o fator água-cimento apresenta efeitos quase insignificantes. Já em resultados obtidos por Forcelini et al. (2016), constatou-se que o aumento no percentual de cimento acarreta em módulo de elasticidade maior, além da diminuição dos vazios das amostras avaliadas.

É importante ressaltar a correlação exponencial entre a resistência à compressão do solo-cimento e a dosagem de cimento. Utilizando menores teores de cimento, a variação da resistência à compressão é relativamente pequena, com teores maiores, o aumento da resistência é melhorada, no entanto, perde-se a ductibilidade (Moreira et al. 2019). Contudo, cabe lembrar que pesquisas recentes têm abordado a adição de outros materiais no processo de estabilização de solos moles, como é o caso dos geopolímeros (Yaghoubi et al., 2019; Lim et al. 2014).

A utilização destes novos materiais é de interesse ambiental, uma vez que contribui para a diminuição da emissão de gás carbônico e redução de custos.

Estudos tem reportado o uso eficiente do cimento para estabilização de solos potencialmente aplicáveis na pavimentação. Horpibulsuk et al. (2010) apresentaram uma argila siltosa estabilizada com cimento usando a energia de compactação normal e modificada e adição de cimento de 3% a 10% por peso. O estudo aborda a evolução do q_u com o aumento da densidade de moldagem, teor de cimento e tempo de cura. Também utilizando a energia de compactação normal Goodary et al. (2012), caracterizaram vários solos estabilizados com cimento de origem vulcânica. Os autores usaram de 3% a 18% de cimento para melhorar a resistência das misturas compactadas. Em um programa experimental realizado por Jan and Mir (2018) para analisar a adição de cimento de 4% a 16% na estabilização de um solo argiloso dragado, notou-se que o q_u aumentou cerca de 15 vezes em referência ao solo em estado puro. O valor ótimo do cimento foi de 12%. Já os autores Chompoorat et al. (2019), melhoram as propriedades mecânicas de um solo sedimentar usando PC para possível uso na construção de pavimentos. O solo sedimentar foi misturado com cimento em uma proporção de 3% a 10% em peso, utilizando o a energia de compactação modificada. A resistência e a durabilidade do solo melhorado foram examinadas com ensaios de compressão simples e de durabilidade contra ciclos de secagem e molhagem, respectivamente. Baldovino et al. (2019) definiram as equações que controlam a resistência mecânica de um solo siltoso melhorado com cimento usando a relação semi-empírica porosidade/cimento. Os autores determinaram uma relação tração/compressão (ξ) de 0,15-0,17 dependendo do tempo de cura. Finalmente, Baldovino e Izzo (2019) calcularam ξ para mistura silte-cimento da FG como 0,15 para 7 dias de cura e energias de compactação normal, intermediária e modificada.

A água tem papel importante no processo de geopolimerização do solo e nas suas misturas. Comparando solos estabilizados com cimento e geopolímeros, constatou-se que o tratamento com cimento Portland é excelente em ambientes úmidos, enquanto os geopolímeros são eficientes em condições secas (Ghadir e Anjbar, 2018). Em solos cimentados, o tempo de cura é uma variável importante a ser observada, pois tem influência direta no ganho de resistência. Tal parâmetro foi evidenciado nos trabalhos de Horpibulsuk et al. (2012), Forcelini et al. (2016), Baldovino et al. (2018a; 2018b) e Yaghoubi et al. (2019). Em misturas de solo-cal estudadas por Nematzadeh et al. (2017), testes de resistência à compressão apresentaram um aumento de resistência de 7 para 14 dias, e 14 para 28 dias de 62 e 53,57% respectivamente.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em 3 etapas. A primeira etapa consiste na caracterização do solo e do cimento. A segunda na moldagem, cura e rompimento dos corpos de prova por compressão simples e tração por compressão diametral. Finalmente, a terceira etapa compreende a moldagem, cura e determinação da massa perdida por escovação dos corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem/secagem (M/S).

3.1. Materiais

Um solo siltoso de cor cinza da Formação Guabirotuba (FG), cimento de alta resistência inicial (ARI) e água destilada foram os materiais utilizados na pesquisa. O solo foi coletado de maneira manual em estado deformado em um talude rodoviário a 2,5 m do nível do terreno natural, no município de São José dos Pinhais, próximo à cidade de Curitiba (Brasil), de maneira manual

e em estado deformado, evitando uma possível contaminação. Observa-se na Tabela 1 as propriedades físicas do solo. Os diâmetros das partículas de solo correspondentes aos 10%, 30%, 50%, 60% e 90% de material passante foram calculados como $D_{10}=0,01$ mm, $D_{30}=0,024$ mm, $D_{50}=0,04$ mm, $D_{60}=0,055$ mm e $D_{90}=0,28$ mm, respectivamente. Adicionalmente, o coeficiente de uniformidade (i.e. $C_u=D_{60}/D_{10}$) e o coeficiente de curvatura [i.e. $C_c=(D_{30})^2/(D_{10}/D_{60})$] foram calculados como $C_u=5,5$ e $C_c=1,05$, respectivamente. Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (ASTM, 2011a), o solo foi classificado como um silte (ML). O solo, de cor cinza, apresenta uma porcentagem de areia média de 15%; areia fina de 25% e silte 60%, sendo a porcentagem de silte ($0,002$ mm < Diâmetro < $0,075$ mm) a que compõe a maior parcela do solo. Durante os ensaios de limites de Atterberg, notou-se que o solo possui um índice de plasticidade de 18,31% e uma massa específica real dos grãos de $2,83$ g/cm³.

De acordo ao sistema rodoviário de classificação - HRB/AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1982), o solo é classificado como A-7-6 com comportamento de fraco a pobre como material de subleito. Adicionalmente, segundo o sistema MCT (Miniatura Compactada Tropical), o solo é classificado não laterítico siltoso com coeficiente $e'=1,68$ e coeficiente $c'=0,85$. Para a classificação MCT foi adotado o procedimento descrito na DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagens) –ME 256 (DNER 1994) e M-196 (DNER 1989).

Tabela 1 – Propriedades do solo

Propriedade	Valor ou comentário	Norma seguida
Limite de liquides, %	44,74	(ABNT, 2016a)
Limite de plasticidade, %	26,43	(ABNT, 2016b)
Índice de plasticidade, %	18,31	-
Massa específica real dos grãos (G_{ss})	2,83	(ASTM, 2014)
Areia meia ($0,2$ mm < diâmetro < $0,6$ mm), %	15	(ABNT, 1995)
Areia fina ($0,06$ mm < diâmetro < $0,2$ mm), %	25	(ABNT, 1995)
Silte ($0,002$ mm < diâmetro < $0,06$ mm), %	60	(ABNT, 1995)
Argila (diâmetro < $0,002$ mm), %	0	(ABNT, 1995)
Diâmetro efetivo (D_{10}), mm	0,01	-
Diâmetro médio das partículas (D_{50}), mm	0,04	-
Coeficiente de uniformidade (C_u)	5,5	-
Coeficiente de curvatura (C_c)	1,05	-
Classificação do solo (SUCS)	ML	(ASTM, 2011b)
Cor	Cinza	-
pH em água	4,7	-
Teor de umidade ótimo (Proctor normal), %	27,0	(ABNT, 2016c)
Peso específico seco máximo (do Proctor normal), kN/m ³	14,52	(ABNT, 2016c)
Teor de umidade ótimo (energia modificada), %	17,6	(ABNT, 2016c)
Peso específico seco máximo (energia modificada), kN/m ³	17,57	(ABNT, 2016c)

É apresentado na Figura 2 uma micrografia (MEV) do solo. Nota-se que as partículas do solo apresentam formas angulares e subangulares. Os resultados da composição química usando FRX (Fluorescência de raios X) do solo é apresentada na Tabela 2, e os resultados da área de estudo 1 do EDS da Figura 2 (realizado sobre uma partícula de solo) são mostrados na Tabela 3.

A composição química do solo e do cimento ARI exibida na Tabela 2, foram determinadas pela Fluorescência de Raios-X. Nota-se que o solo é composto, principalmente, por sílica e alumina com pequena parcela de óxido sulfúrico, óxido de ferro, óxido de potássio e dióxido de

titânio. O cimento é, principalmente, composto por óxido de cálcio e sílica. A massa específica dos grãos do cimento foi calculada como 3,11 de acordo com a norma brasileira NBR 16605 (ABNT, 2017). O cimento tem resistência axial de 44,7 MPa e 54,2 MPa aos 7 e 28 dias, respectivamente, segundo dados do fabricante. Este tipo de cimento foi escolhido porque proporciona maiores ganhos de resistência mecânica aos solos da Formação Guabirotuba em referência aos outros tipos de cimento como concluído no estudo de Baldovino et al. (2019).

Água destilada foi usada para a caracterização dos materiais, ensaios de compactação, confecção dos corpos de prova submetidos à compressão, tração e durabilidade, assim como, para a saturação das amostras, evitando reações não desejadas.

Tabela 2 – Composição química do solo e do cimento

Composto	Concentração por peso (%)	
	Solo	Cimento
SiO ₂	49,82	18,96
Al ₂ O ₃	43,40	4,30
Fe ₂ O ₃	0,12	2,95
K ₂ O	0,29	-
TiO ₂	0,52	-
SO ₃	4,82	3,18
CaO	-	60,76
MgO	-	3,26
Perda ao fogo	1,03	0,77

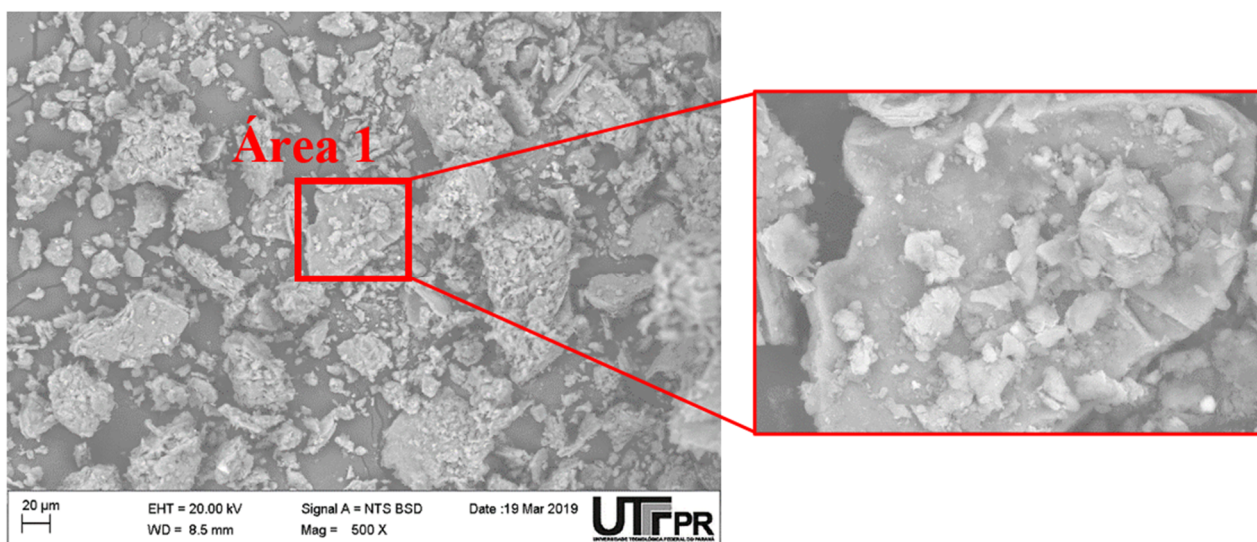


Figura 2. Micrografia (MEV) de uma amostra de solo e posição da área de estudo do EDS

3.2. Definição dos teores de cimento, pontos de moldagem e tempos de cura

Os pontos de moldagem utilizados para a confecção dos corpos de prova para os ensaios de durabilidade, tração e compressão simples foram definidos como $\gamma_d=14 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_d=15 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_d=16 \text{ kN/m}^3$, com um teor de umidade de moldagem constante de $\omega=23\%$. Tais pontos foram definidos estrategicamente considerando possíveis condições de campo com variação do peso específico seco (γ_d) em 1 kN/m^3 . Pontos de moldagem semelhantes com $\omega=23\%$ fixa foram recentemente estudados por Baldovino et al. (2019) em misturas de solo-cimento usando um silte rosa da formação Guabirotuba. Adicionalmente, devido a que em 23% de teor de umidade, tem-

se as maiores resistências adequadas à relação porosidade/cimento. Este teor foi escolhido para a moldagem das amostras solo-cimento (Consoli et al. 2017b). No presente trabalho, os teores de cimento foram de $C = 3, 5, 7$ e 9% em relação à massa seca do solo. Tal parâmetro foi definido de acordo com a experiência brasileira em estabilização de solos com cimento (Consoli et al. 2017; Festugato et al., 2017; Moreira et al., 2019; Baldovino et al., 2019). Já em relação ao tempo de cura adotado, foram utilizados 7 (tempo no qual se dá a hidratação do cimento), 14 e 28 para posteriormente avaliar a tração e a compressão. Além disso, 7 dias também foi escolhido como o tempo de cura para os corpos de prova para o ensaio de durabilidade.

3.3. Moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foram moldados corpos de prova de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Nos ensaios de durabilidade os corpos de prova moldados eram de 12,72 cm de altura e 10 cm de diâmetro (volume = 1000 cm^3). Depois da coleta em campo, o solo foi totalmente seco em estufa a temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, e colocado em porções uniformemente distribuídas para ser misturado ao cimento. Adicionou-se a quantidade de cimento seco, em relação ao peso seco da amostra de solo, em quatro teores diferentes de adição (3, 5, 7 e 9%). Foi feita a mistura do solo com o cimento, de modo que, a mistura ficasse a mais homogênea possível. Em seguida, foi adicionada uma porcentagem de água em peso, sendo esta porcentagem referente ao teor de umidade de moldagem igual a 23% (Baldovino et al., 2019). A mistura do solo-cimento com a água destilada foi realizada em um período não superior a 7 minutos, com isto tentando minimizar as reações do cimento com a água antes do processo de moldagem dos corpos de prova. As amostras para a moldagem dos corpos de prova foram compactadas estaticamente em três camadas em um molde de aço inox. Durante a compactação, entre as camadas do espécime foi realizado o procedimento de escarificação como procedimento padrão. Para assegurar o peso específico seco de moldagem, foi realizado o cálculo do volume do molde e do peso de mistura úmida (dividida em três partes) necessários para cada corpo de prova. Após esses cálculos, foi pesada a quantidade necessária de material para cada corpo de prova. A moldagem foi feita com a ajuda de uma prensa hidráulica manual. Depois de cada processo de moldagem, três amostras da mistura eram tomadas para medir o teor de umidade em estufa a $100 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24 horas.

Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de 0,01 g e suas dimensões foram medidas com o uso de um paquímetro com 0,1 mm de erro. Os corpos de provas extraídos de seus moldes foram envoltos com plástico filme transparente para manter o teor de umidade. Por último, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida para processo de cura durante 7, 14 e 28 dias (para o ensaio de durabilidade, apenas 7 dias), na temperatura média de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, para prevenir mudanças significativas de umidade até o dia do ensaio.

As amostras tinham de respeitar os seguintes erros máximos para serem usadas nos ensaios de compressão simples: peso específico seco de moldagem (γ_d) de $\pm 1\%$ e teor de umidade (ω) de $\pm 0,5\%$ (Baldovino et al., 2018a). Nas 24 horas que antecediam os ensaios de tração e compressão, os corpos de prova permaneceram submersos em água destilada, a fim de saturar as amostras e evitar a influência da sucção sobre os valores finais de resistência (Moreira et al., 2019). É apresentado na Figura 3: os materiais utilizados (a), a mistura solo-cimento homogeneizada (b) e um corpo de prova confeccionado (c) para realização de ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral.

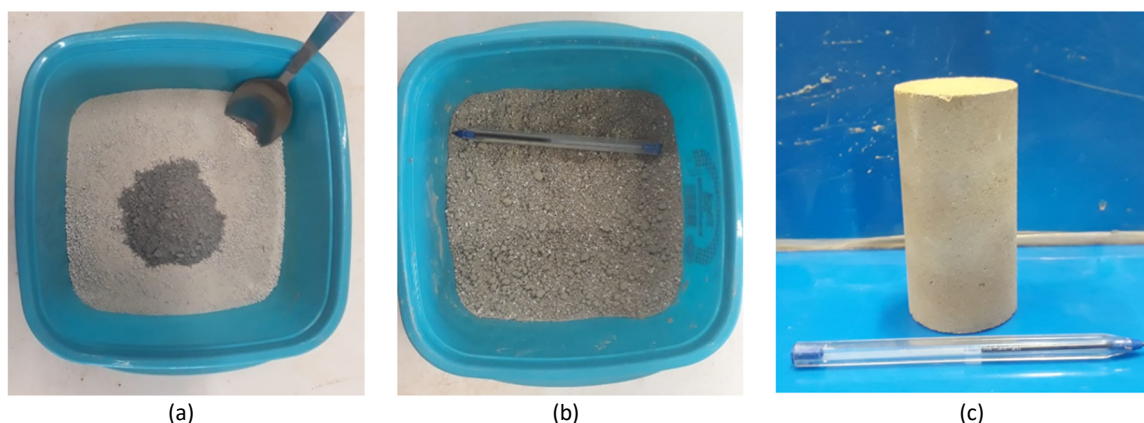


Figura 3. (a) Materiais: solo e cimento CPV. (b) Mistura de solo-cimento e água homogeneizados. (c) Visual de corpo de prova para ensaio de resistência mecânica

3.4. Ensaio de resistência mecânica e durabilidade

Para a realização dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral foi utilizada uma prensa automática com capacidade de 30 kN. Os ensaios foram feitos com um sistema automatizado, medindo, principalmente, a força aplicada e a deformação com uma sensibilidade de 0,01 mm, sendo a velocidade do ensaio de 1,10 mm/min. Os procedimentos para os ensaios de compressão simples seguiram a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007). A resistência à compressão simples é o valor da carga máxima de ruptura do material ou o valor da pressão correspondente à carga na qual ocorre deformação específica do corpo de prova de 20%, naqueles casos em que a curva tensão-deformação axial não apresenta um pico máximo. Adota-se a resistência à compressão não confinada ou simples (q_u) de acordo com a Equação 1, quando, no ensaio a curva tensão-deformação axial, observa-se um pico máximo (Baldovino et al., 2018a)

$$q_u = \frac{P_R}{A_T} \quad (1)$$

Onde, P_R é a carga de ruptura no pico da curva tensão-deformação axial e A_T é a área da seção transversal corrigida do corpo de prova. Adota-se a resistência à tração (q_t) de acordo com a Equação 2, quando, no ensaio a curva tensão-deformação axial, observa-se um pico máximo:

$$q_t = \frac{2P_R}{\pi DH} \quad (2)$$

Onde, P_R é a carga de ruptura no pico da curva tensão-deformação diametral, D e H são o diâmetro e a altura do corpo de prova, respectivamente. Os procedimentos dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (q_t) seguiram a norma brasileira NBR 7222 (ABNT, 2011) baseada na norma americana ASTM C496 (ASTM, 2011c).

Quanto aos ensaios de durabilidade, cada ciclo de M/S começou com o ciclo de molhagem das amostras em água destilada à 23°C por 5 horas. Depois do umedecimento, as amostras foram retiradas e colocadas em estufa por 42 h para secagem a 70°C. Após o ciclo de secagem, as amostras foram submetidas à escovação (com escova especificada na norma ASTM D559-15) para medir a perda de massa. Foram realizados 2 ciclos de 18 a 19 escovadas nas faces laterais, e 4 escovadas nas duas faces transversais dos corpos de prova, aplicando uma força média de 1,5 kg, a qual foi monitorada em uma balança de precisão. Para evitar o máximo possível de variáveis de erro operacionais, todos os ensaios de escovação foram feitos pelo mesmo operador durante os 12 ciclos durante 24 dias. Os procedimentos dos ensaios de durabilidade seguiram a norma americana ASTM D559 (ASTM, 2015).

3.5. Microanálise estrutural

Microanálises químicas de duas amostras de solo-cimento (com 3 e 5% de cimento compactadas no peso específico seco de 14 kN/m^3), após 28 dias de cura, foram analisadas usando a Espectroscopia Dispersiva de Energia (EDS) com um X-ACT Oxford (Penta FET125 Precision). Foram realizadas uma microanálise de massa usando um analisador de micromassa a laser (LAMMA-1000, modelo X-ACT).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Influência do índice porosidade/cimento na resistência

São apresentados na Figura 4 os resultados da resistência à compressão simples das misturas solo-cimento influenciados pela relação porosidade/teor volumétrico de cimento (η/C_{iv}). Nota-se que os resultados de compressão simples aumentam quando η/C_{iv} diminui. Para que haja uma compatibilidade entre η e C_{iv} é necessário ajustar o fator C_{iv} a um expoente "x" $[\eta/C_{iv}^x]$. O expoente depende do tipo de solo e das propriedades do cimento (Baldovino et al., 2019). Neste trabalho, o valor de x foi calculado como 0,25. O índice $\eta/C_{iv}^{0,25}$ também influencia diretamente sobre os resultados de resistência à tração por compressão diametral como é exibido na Figura 5.

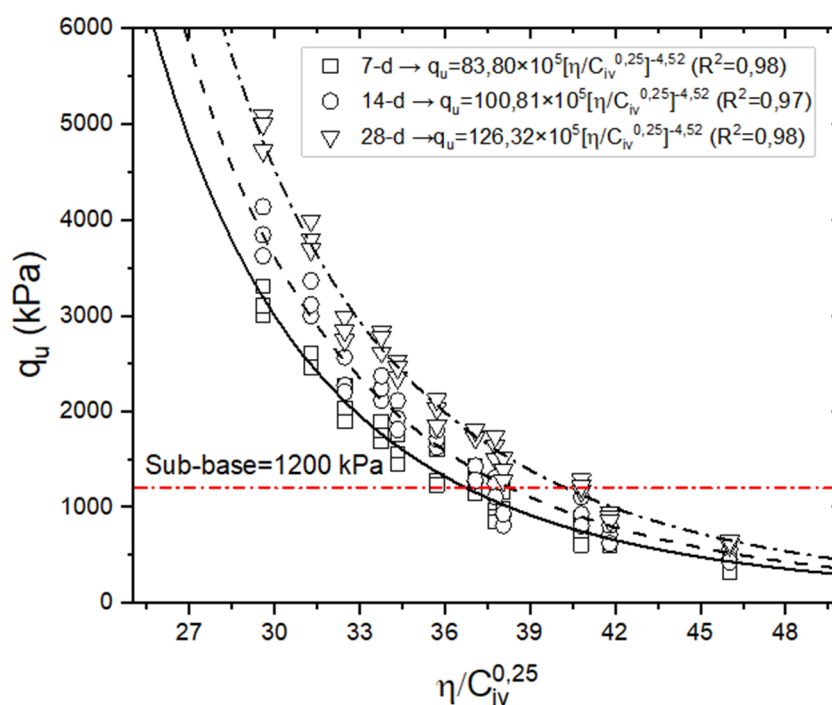


Figura 4. Variação da resistência à compressão simples influenciada pela relação porosidade/teor volumétrico de cimento ($\eta/C_{iv}^{0,25}$)

Os valores de $q_u \cdot [\eta/C_{iv}^{0,25}]$ e $q_t \cdot [\eta/C_{iv}^{0,25}]$ são independentes do tempo de cura. Já o valor de η inicial das misturas depende do peso específico seco de moldagem: $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$ ($\eta = 49,22\%$), $\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$ ($\eta = 45,5\%$) e $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ ($\eta = 42,2\%$). Por outro lado, C_{iv} depende da quantidade de cimento (em volume) por volume de solo+vazios (vazios=água+ar) no qual está contido. Com isto, menores valores de η e maiores valores de C_{iv} significam maiores valores de resistência mecânica. Também pode ser visto nas Figuras 4 e 5 um acréscimo nos valores de q_u e q_t com o

aumento do tempo de cura (t). Para cada tempo de cura, obteve-se uma equação que correlaciona $\eta/C_{iv}^{0,25}$ à q_u e $\eta/C_{iv}^{0,25}$ à q_t . A equação tem a forma geral: $q_u \vee q_t = A[\eta/C_{iv}^x]^{-y}$, onde **y** é um expoente de ajuste que depende das propriedades do aglomerante, e A é uma constante (em kPa) que cresce dependendo do tempo de cura, tanto para q_u como para q_t . Os parâmetros “x” e “y” também foram calculados para outro tipo de misturas. Moreira et al. (2019) calcularam $x=0,28$ e $y=4,47$ para misturas silte-cimento-resíduo de telha moída. Baldovino et al. (2019) calcularam $x=0,45$ e $y=2,00$ para misturas silte amarelo da FG e cimento CPV e sugeriram que os valores de x menores a 1 são mais comuns para solos finos estabilizados com cimento, e valores x próximos a 1 são mais comuns em areia-cimento. Diambra et al. (2017), sugeriram que $x=1/y$ para modelagem de resistência de misturas areia fina-cimento. Assim, teoricamente, para o presente estudo, o valor de x deveria ser: $x=1/y=1/4,52=0,22$, mas nota-se para as misturas propostas de silte cinza-cimento que: $x=1,13/y$.

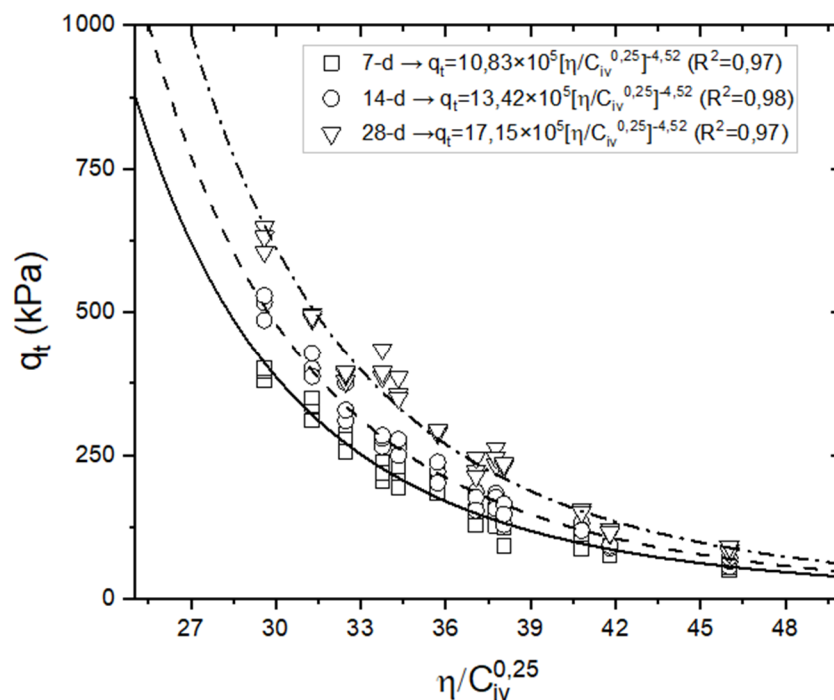


Figura 5. Variação da resistência à tração por compressão diametral influenciada pela relação porosidade/teor volumétrico de cimento ($\eta/C_{iv}^{0,25}$)

Excelentes correlações entre q_u - $[\eta/C_{iv}^{0,25}]$ e q_t - $[\eta/C_{iv}^{0,25}]$ foram obtidas (com R^2 maiores a 0,97). As equações que controlam q_u para 7, 14 e 28 dias, são, respectivamente [Eqs. (3)-(5)]:

$$q_u = 83,80 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,97) \quad (3)$$

$$q_u = 100,81 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,98) \quad (4)$$

$$q_u = 126,32 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,97) \quad (5)$$

As equações que controlam q_t para 7, 14 e 28 dias, são, respectivamente [Eqs. (6)-(8)]:

$$q_t = 10,83 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,98) \quad (6)$$

$$q_t = 13,42 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,97) \quad (7)$$

$$q_t = 17,15 \times 10^5 [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52} \quad (R^2=0,98) \quad (8)$$

Levando em consideração as aplicações em campo, as dosagens e os tempos de cura dependerão das especificações do projeto de pavimentação, que quase sempre é curto, devido ao cronograma de execução. Em geral, 78% das misturas compactadas de cimento com solo atingem os requisitos mínimos para uso em sub-base, de acordo com a norma americana *TxDOT- Tex-120-E* (Departamento de Transporte do Texas, 2013) e a norma Brasileira DNIT 143 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010), como pode ser observado na Figura 4 (veja as linha horizontal pontilhada). Segundo tais normas, o requisito mínimo seria de $q_u = 1200$ kPa e $q_u = 2100$ kPa para sub-base e base, respectivamente. O mínimo requerido em norma é obtido com 5% de cimento e, com 3% de cimento quando compactado acima de $\gamma_d = 15$ kN/m³. Com a finalidade de evitar altos teores de cimento, o critério $\eta/C_{iv}^{0,25}$ pode ser empregado para atingir 1200 kPa de resistência, aumentando a energia de compactação e diminuindo a quantidade de cimento para 4%, sem que haja a necessidade de realização de ensaios confirmatórios. Baldovino et al. (2018b) obteve 1200 kPa de resistência à compressão simples em 90-dias de cura para misturas solo rosa da FG-9% de cal. Este valor é igual ao obtido com 3%C, compactando em $\gamma_d=16$ kN/m³ e curado de 7-dias (Figura 4). Consequentemente, a adição cimento CPV no solo cinza da FG diminui o consumo de cal. Em misturas de solo rosa da FG-7% de cimento CPV curadas em 28-d, Baldovino et al. (2019) obteve também 1200 kPa de resistência à compressão simples. Baldovino et al. (2020a) estabilizaram o solo amarelo da FG estabilizado com CPV. Após 28-d de cura, os autores encontraram que a resistência à compressão adicionando 9% de cimento foi de 1200 kPa aproximadamente. Assim, comparando a estabilização do solo cinza usado no presente estudo e os outros solos do perfil Guabiro tuba com cimento/cal, se pode afirmar que o consumo de cimento pode ser reduzido se é solo de cor cinza é usado para pavimentação. Essa superioridade se dá principalmente pela composição química do solo e pela distribuição do tamanho das partículas (i.e., C_c e C_u), como demonstrado em estudos prévios (Rios et al., 2013).

4.1. Relação tração/compressão

Uma relação empírica entre a compressão e a tração pode ser calculada em termos do tempo de cura das amostras solo-cimento. Esta relação pode ser chamada de $\xi = q_t/q_u$, e é independente da relação $\eta/C_{iv}^{0,25}$. Desta maneira, as Equações que descrevem o crescimento de q_u e q_t em função de $\eta/C_{iv}^{0,25}$ (ver Figuras 4 e 5 e Equações 3 a 8) podem ser expressas como uma constante, dividindo as Equações 3 a 8 por $10^8 \times [\eta/C_{iv}^{0,25}]^{-4,52}$. A relação q_t/q_u assegura uma constante decimal cujo valor foi determinado na Figura 6. Em geral, ξ assume um valor de 0,13. Assim, verifica-se que q_t é 13% do valor de q_u . A relação ξ também pode ser calculada de maneira direta, correlacionando os valores experimentais de tração e compressão, em um mesmo plano Cartesiano, como é exibido na Figura 7. Os valores de ξ encontram-se em uma faixa de $\pm 3\%$ (entre 0,10-0,17) do valor médio $\xi = 0,13$. Assim, conclui-se que o valor não muda, e é independente das condições de moldagem.

Segundo Diambra et al. (2017), para solos arenosos cimentados artificialmente, a existência de uma relação entre as resistências à tração/compressão ($q_t/q_u=\xi$) é independente do tempo de cura e está governada, principalmente, pela relação à tração (ou propriedades de fricção) do cimento. Autores como Consoli et al. (2017b) calcularam uma relação q_t/q_u de 0,13 para misturas de solos finos compactos com cimento Portland usando teores de umidade de moldagem de 17, 20 e 23% e pesos específicos secos de moldagem entre 14 kN/m³ e 16 kN/m³ igual aos

apresentados neste artigo. Festugato et al. (2017) fizeram misturas de um solo arenoso com cimento e fibras de polipropileno, para o solo sem fibras calcularam um valor para "ξ" de 0,10 e para o solo reforçado com fibras encontraram um valor de $\xi = 0,15$ usando uma relação de $\eta/C_{iv}^{0,28}$. Outros autores como Baldovino et al. (2020a) calcularam a relação ξ entre 0,15 e 0,17 para misturas solo amarelo da FG e cimento CPV. Baldovino e Izzo (2019) concluíram que o valor de ξ para misturas solo-cimento curadas durante 7 dias é de 0,15. Por fim, nota-se que a relação de resistência ξ para solos cimentados/reforçados varia em média entre 10% e 17%. Deste modo, a relação empírica de q_t e q_u apresentada neste estudo ($\xi=0,13$) está dentro dessa faixa.

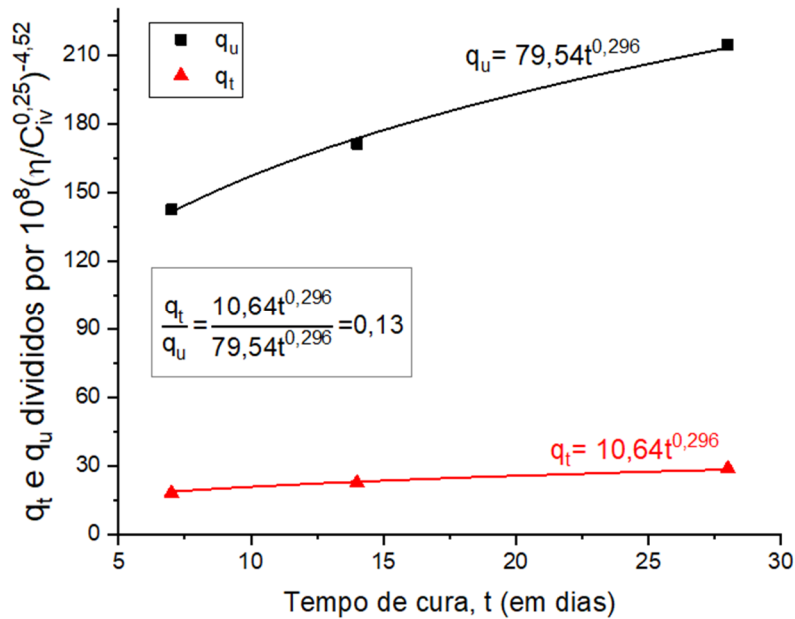


Figura 6. Variação da resistência à compressão e tração com tempos de cura de 7, 14 e 28 dias e normalizadas por um valor de $10^8[\eta/C_{iv}^{0,25}]$

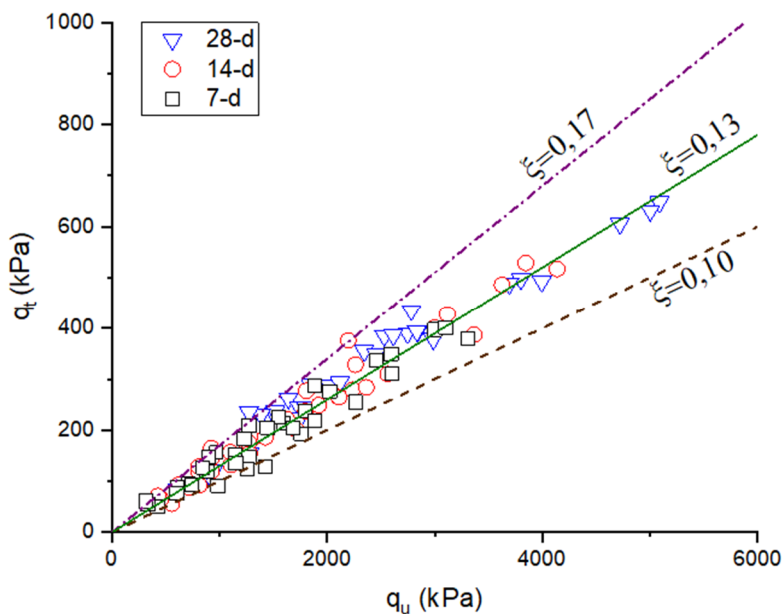


Figura 7. Relação direta entre tração-compressão

4.2. Durabilidade das misturas

Cada ciclo de M/S começou com os corpos de prova imersos em água por 5 horas e secado em estufa por 42 horas. A aparência dos corpos de prova antes do 1.º ciclo é mostrada na Figura 8, assim como, também, a aparência depois de 12 ciclos de M/S. Observa-se que todos os corpos de prova mantiveram a sua forma cilíndrica, exceto os compactados com 3% de cimento, os quais foram se deteriorando e perdendo, progressivamente, grandes porcentagens de massa, como é observado na Figura 9. Na Figura 10 pode ser observada a perda acumulada de massa (PAM) das misturas influenciada pelo número de ciclos de M/S. Observa-se que as misturas com 3% de cimento perderam 100% de sua massa depois do 3º e 11º ciclo, nos pesos específicos de $\gamma_d = 14 \text{ kN/m}^3$ e 15 kN/m^3 , respectivamente (i.e. misturas $C_3\gamma_{14}$ e $C_3\gamma_{15}$). Adicionalmente, a mistura $C_3\gamma_{16}$ perdeu 75% de sua massa (Figuras 7 e 9). As misturas com 5, 7 e 9% de cimento perderam menos de 10% de massa como é mostrado na Figura 11 (ampliação da Figura 10). A PAM está diretamente relacionada à quantidade de cimento utilizada e vazios iniciais do corpo de prova. Por isso, a PAM foi correlacionada à relação $\eta/C_{iv}^{0,25}$, como pode ser visto na Figura 12. O índice vazios/cimento também controla a PAM das misturas compactadas que se eleva com o aumento de $\eta/C_{iv}^{0,25}$. As correlações entre $PAM-\eta/C_{iv}^{0,25}$ obtiveram excelentes ajustes, com $R^2 \geq 0,93$.



Figura 8. Corpos de prova de durabilidade antes de serem submetidos a ciclos de molhagem/secagem e aparência deles após 12 ciclos M/S

Para solos siltosos estabilizados quimicamente com aplicação em pavimentação, o valor de PAM não deve exceder 7-8%, segundo a PCA (1992). Todas as misturas, exceto as moldadas com 3% de cimento, cumprem esse requerimento. No entanto, mesmo que 3% de cimento acima de $\gamma_d=15 \text{ kN/m}^3$ seja viável do ponto de vista de resistência, não poderia ser empregado em termos de durabilidade. Assim, 5% é considerado o teor de cimento mais apropriado para estabilizar o silte cinza da FG, baseado nas propriedades mecânicas e de durabilidade desse tipo de solo.

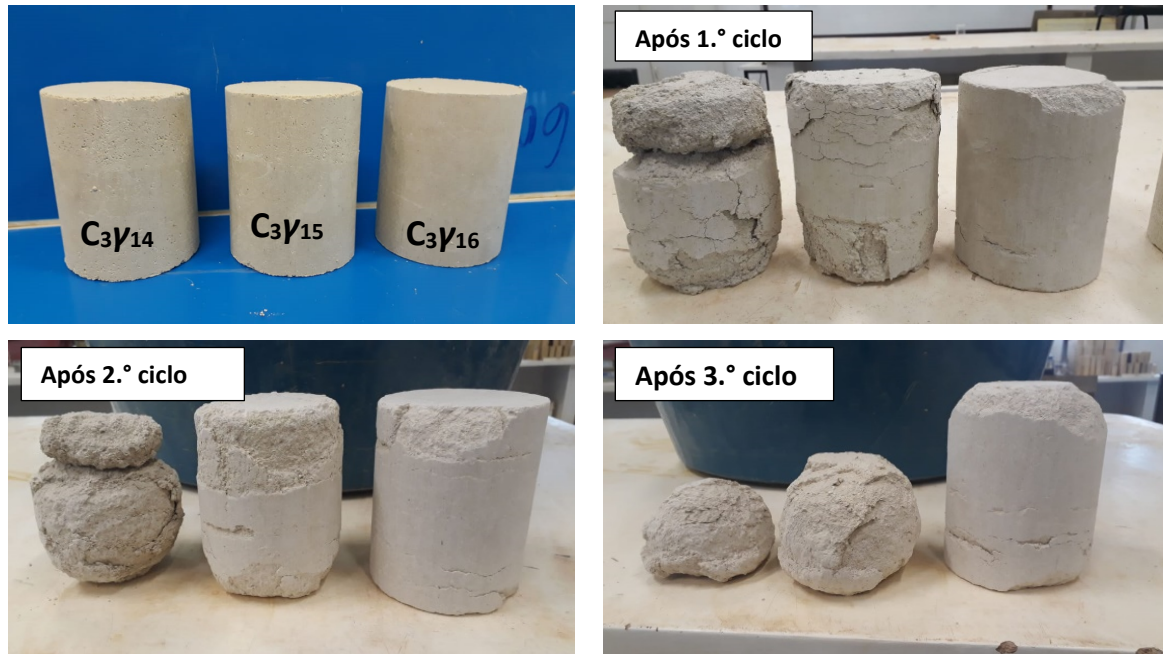


Figura 9. Corpos de provas de durabilidade usando 3% de cimento antes dos ciclos M/S e aparência dos mesmos após o 1.º, 2.º e 3.º ciclo.

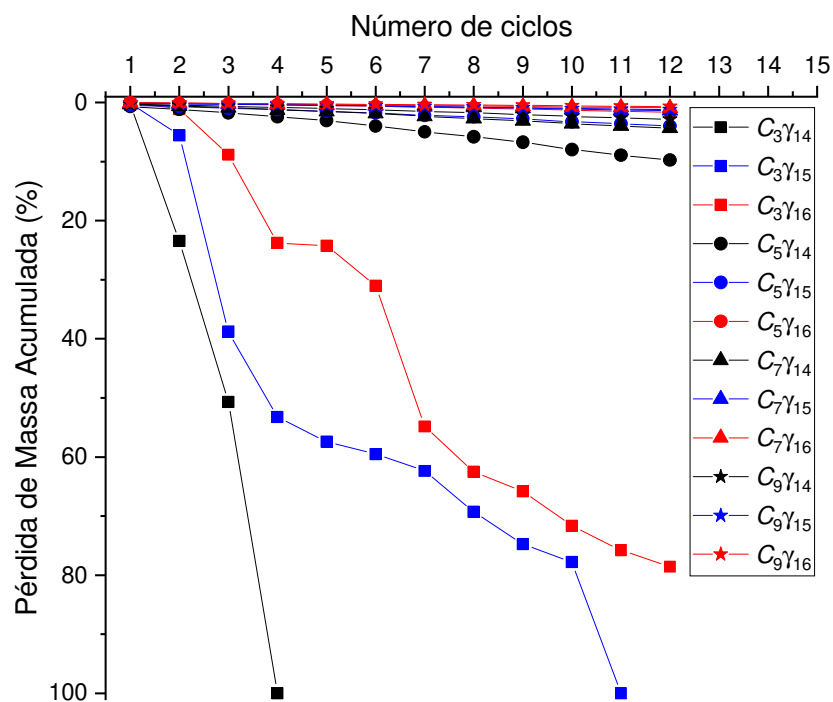


Figura 10. Influência do número de ciclos M/S sobre a perda acumulada de massa para cada mistura solo-cimento.

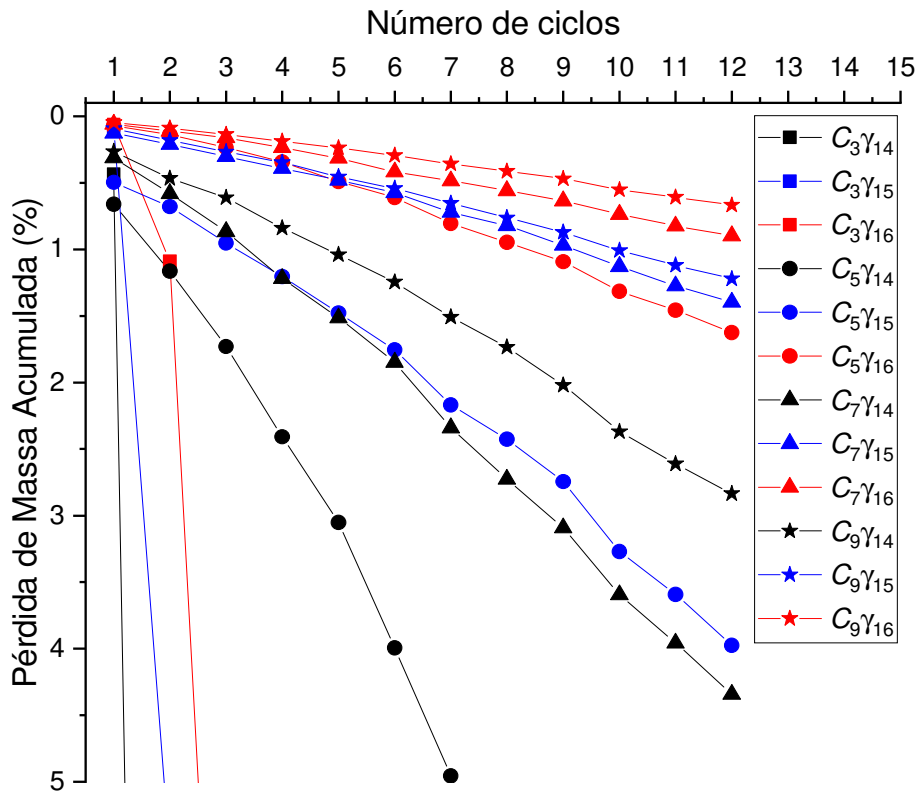


Figura 11. Ampliação (zoom) da influência do número de ciclos M/S sobre a perda acumulada de massa (de 0 a 5%) para cada mistura solo-cimento mostrada na Figura 10

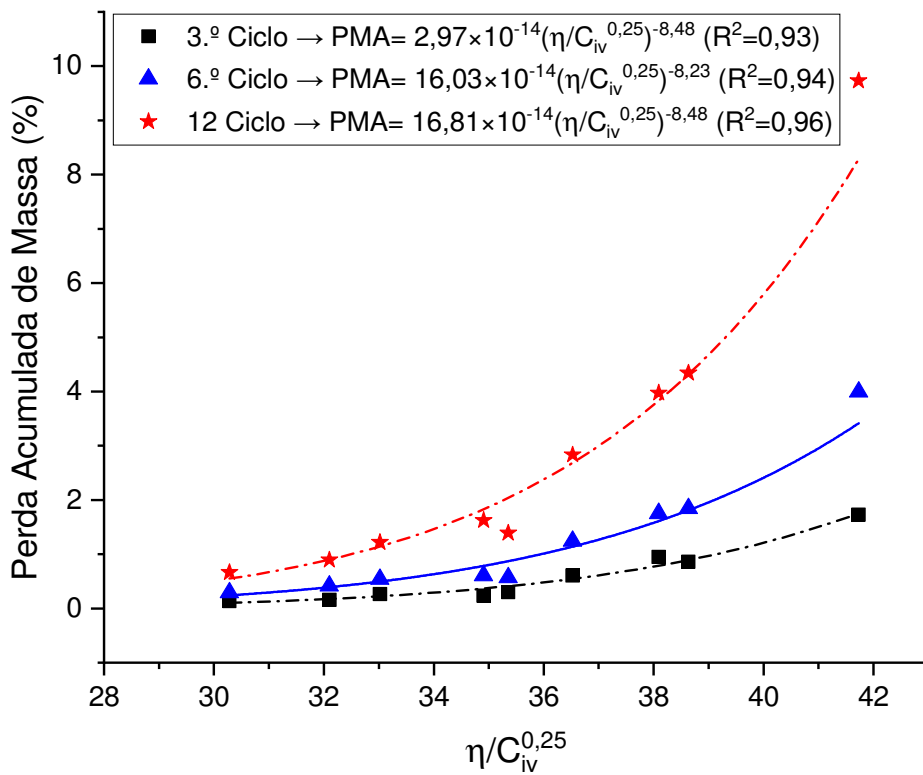


Figura 12. Influência da relação $\eta/C_{IV}^{0,25}$ sobre a perda acumulada de massa para os ciclos 3, 6 e 12

4.1. Microanálises química

A composição química do geomaterial (solo-cimento) foi analisada empregando o MEV e o EDS. A microanálise é apresentada na Figura 13 e os resultados do EDS são apresentados na Tabela 3. O conteúdo de cada elemento químico na área 2 e 3 (Figura 13 e Tabela 3) localizado na morfologia vítrea corresponde, em grande parte, aos resultados das análises de FRX (Tabela 2) das matérias-primas (solo e cimento). Os resultados da microanálise demonstram um grande nível de heterogeneidade, que já é tipicamente encontrado nas matérias-primas. A não formação de novos minerais, que pode ser explicado pela ausência de elementos amorfos (Baldovino et al. 2020b). A inexistência de novos elementos pode ser explicada pela moderada temperatura de cura das misturas (aproximadamente 23° C). Finalmente, pode ser observado na Figura 13, que ao se adicionar 5% de cimento, formou-se uma estrutura mais compacta e homogênea, reduzindo os vazios depois de 28 dias de cura, em comparação com 3% de cimento.

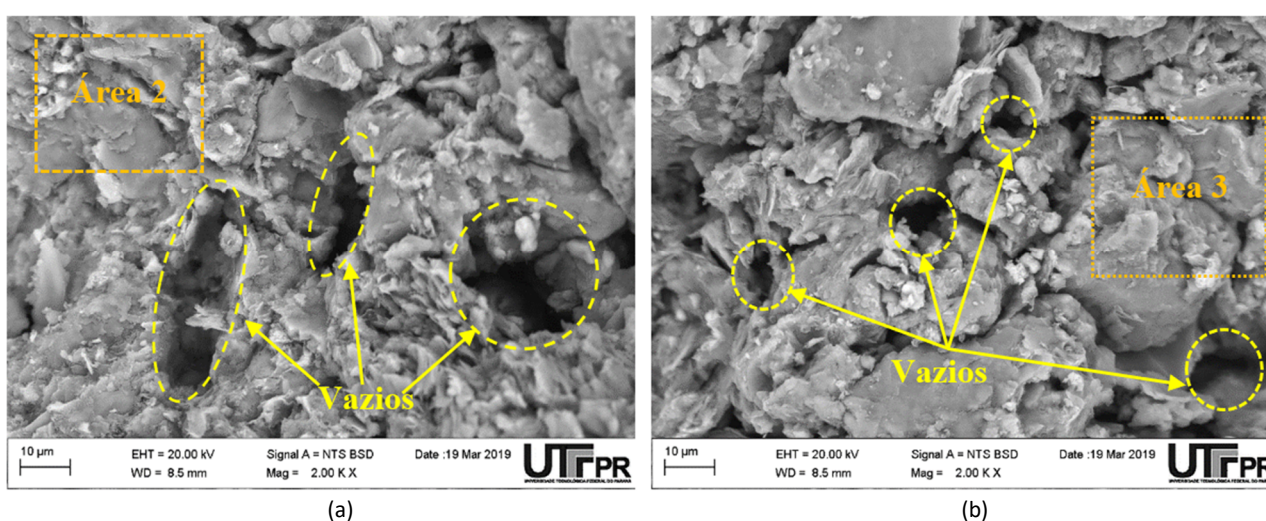


Figura 13. Micrografia (MEV) das misturas solo-cimento e posição das áreas de estudo do EDS. (a) Amostra com $\eta/C_{iv}^{0,25}=40$ (3% de cimento) curada durante 28-d e (b) Amostra com $\eta/C_{iv}^{0,25}=37$ (5% de cimento) curada durante 28-d.

Tabela 3 – Resultados do EDS das áreas 1, 2 e 3 mostradas na Figura 2 e na Figura 13

Área	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
1-Solo	7,99	61,40	14,56	14,81	0,34	0,90	-	-	-
2- 3% cimento	9,81	61,81	0,33	9,14	13,35	0,16	4,18	0,42	0,81
3 -5% cimento	10,41	58,91	0,28	10,33	12,40	5,41	0,73	1,54	10,41

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, um solo da camada cinza da FG foi estabilizado com diferentes teores de cimento para aplicação em pavimentação na região metropolitana de Curitiba. Para verificar seu potencial uso na construção de sub-base de pavimentos foi realizada uma bateria de ensaios de resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, empregando tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. Também foram realizados ensaios de durabilidade, empregando 12 ciclos de M/S. De acordo com os resultados, as seguintes conclusões podem ser ponderadas:

- O aumento do teor de cimento e do peso específico de moldagem aumentaram a resistência à compressão simples e tração por compressão diametral, assim como, melhoram a microestrutura das misturas reduzindo os vazios. A resistência das misturas também

aumentou (em 50%, comparando 7 e 28 dias) com o tempo de cura. Foram obtidos valores de q_u maiores que 1200 kPa (valor mínimo requerido para sub-base) empregando 4% de cimento.

- Uma relação tração/compressão foi calculada como sendo de 0,13, a qual é independente do tempo de cura.
- A resistência (tanto compressão quanto tração) e a perda de massa acumulada (PAM) das misturas é influenciada diretamente pelo índice porosidade/cimento ajustado a um expoente de 0,25, que fez compatível a variação da porosidade, volume de cimento e valores de q_u , q_t e PAM. A compatibilidade das variáveis foi descrita por equações potenciais com ajustes de $R^2 \geq 0,93$ e $R^2 \geq 0,97$ para durabilidade e resistência, respectivamente.
- Embora o teor de 3% satisfizesse os requisitos de resistência mecânica, em termos de durabilidade, 5% de cimento é o teor mínimo a ser empregado no solo. Assim, 5% se converte no teor mais apropriado para estabilizar o silte cinza da FG. Além disso, comparando a estabilização do solo cinza usado no presente estudo e os outros solos do perfil Guabirotuba com cimento/cal, se pode afirmar que o consumo de cimento pode ser reduzido se o solo de coloração cinza é empregado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e com os apoios financeiros do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)-Código de Financiamento 001- e da Fundação e da Fundação Araucária do Paraná, Brasil. Os autores agradecem ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR pelo suporte na realização das microanálises químicas.

REFERÊNCIAS

- ABNT (1995). NBR 6502: Rochas e solos. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2007). NBR 5739 - Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2011). NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2016a). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2016b). NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2016c). NBR 7182 - Solo - Ensaio de Compactação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2017). NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro, RJ.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1982). AASHTO Materials, Part I, Specifications, Washington, D.C.
- ASTM (2011a). ASTM D2487 - Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*, (August), 1–16.
- ASTM (2011b). ASTM D 2487 - 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International, West Conshohocken, Pa*, D5521-5, 1–5.
- ASTM (2011c). ASTM C 496/C 496M - 11 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete. *ASTM International, West Conshohocken, Pa*, 1–5.
- ASTM (2014). ASTM D 854 - 14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer 1. *ASTM International, West Conshohocken, Pa*.
- ASTM (2015). ASTM D559/D559M Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. *ASTM International, West Conshohocken, Pa*, 1–6.
- BALDOVINO, J. A. (2018). Comportamento mecânico de um solo siltoso da formação geológica Guabirotuba tratado com cal em diferentes tempos de cura. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná*.
- BALDOVINO, J. A., MOREIRA, E. B., IZZO, R. L. DOS S., AND ROSE, J. L. (2018a). Empirical Relationships with Unconfined Compressive Strength and Split Tensile Strength for the Long Term of a Lime-Treated Silty Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 6018008. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002378

- BALDOVINO, J. A., MOREIRA, E. B., TEIXEIRA, W., IZZO, R. L. S., AND ROSE, J. L. (2018b). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(1), 188–194. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.10.001
- BALDOVINO, J. DE J. A., IZZO, R. L. DOS S., PEREIRA, M. D., ROCHA, E. V. DE G., ROSE, J. L., AND BORDIGNON, V. R. (2020a). Equations Controlling Tensile and Compressive Strength Ratio of Sedimentary Soil–Cement Mixtures under Optimal Compaction Conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1), 4019320. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002973
- BALDOVINO, J. DE J. A., MOREIRA, E. B., CARAZZAI, É., ROCHA, E. V. DE G., DOS SANTOS IZZO, R., MAZER, W., AND ROSE, J. L. (2019). Equations controlling the strength of sedimentary silty soil–cement blends: influence of voids/cement ratio and types of cement. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1–14. DOI: 10.1080/19386362.2019.1612134
- BALDOVINO, J. DE J. A., IZZO, R., ROSE, J. L., AVANCI, M. (2020b). Geopolymers Based on Recycled Glass Powder for Soil Stabilization. *Geotech Geol Eng.* Online DOI:10.1007/s10706-020-01274-w
- BALDOVINO, J. J. A., AND IZZO, R. DOS S. (2019). Relação porosidade/cimento como parâmetro de controle na estabilização de um solo siltoso. *COLLOQUIUM EXACTARUM*, 11(1), 89–100. DOI: 10.5747/ce.2019.v11.n1.e269
- BUNAWAN, A. R., MOMENI, E., ARMAGHANI, D. J., NISSA BINTI MAT SAID, K., AND RASHID, A. S. A. (2018). Experimental and intelligent techniques to estimate bearing capacity of cohesive soft soils reinforced with soil-cement columns. *Measurement*, 124, 529–538. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.04.057
- CHEN, C., ZHANG, G., ZORNBERG, J. G., MORSY, A. M., ZHU, S., AND ZHAO, H. (2018). Interface behavior of tensioned bars embedded in cement-soil mixtures. *Construction and Building Materials*, 186, 840–853. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.211
- CHOMPOORAT, T., MAIKHUN, T., AND LIKITLERSUANG, S. (2019). Cement-improved lake bed sedimentary soil for road construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 172(3), 192–201. DOI: 10.1680/jgrim.18.00076
- CONSOLI, N. C., MARQUES, S. F. V., FLOSS, M. F., AND FESTUGATO, L. (2017a). Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 1–7. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001858
- CONSOLI, N. C., QUIÑÓNEZ, R. A., GONZÁLEZ, L. E., AND LÓPEZ, R. A. (2017b). 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*, 29(5), 4016277. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001819
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2010). Pavimentação – Base de solo-cimento. DNIT 143-10. DNIT.
- DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DE TEXAS (2013). (TxDOT) test procedure for soil-cement testing. *Tex-120-E, Austin, TX*.
- DIAMBRA, A., IBRAIM, E., PECCIN, A., CONSOLI, N. C., AND FESTUGATO, L. (2017). Theoretical Derivation of Artificially Cemented Granular Soil Strength. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(5), 4017003. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001646
- DNER. (1989). Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT. DNER – M 196. *Departamento de Estradas e Rodagem*.
- DNER. (1994). Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão – método de ensaio. DNER-ME 256. *Departamento de Estradas e Rodagem*.
- FAN, J., WANG, D., AND QIAN, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791–797. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.004
- FAROUK, A., AND SHAHIEN, M. M. (2013). Ground improvement using soil–cement columns: Experimental investigation. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 733–740. DOI: 10.1016/j.aej.2013.08.009
- FESTUGATO, L., MENGER, E., BENEZRA, F., KIPPER, E. A., AND CONSOLI, N. C. (2017). Fibre-reinforced cemented soils compressive and tensile strength assessment as a function of filament length. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(1), 77–82. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2016.09.001
- FORCELINI, M., GARBIN, G. R., FARO, V. P., AND CONSOLI, N. C. (2016). Mechanical Behavior of Soil Cement Blends with Osorio Sand. *Procedia Engineering*, 143, 75–81. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.010
- GHADIR, P., AND RANJBAR, N. (2018). Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 188, 361–371. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207
- GOODARY, R., LECOMTE-NANA, G. L., PETIT, C., AND SMITH, D. S. (2012). Investigation of the strength development in cement-stabilised soils of volcanic origin. *Construction and Building Materials*, 28(1), 592–598. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.054
- HORPIBULSUK, S., CHINKULKIJNIWAT, A., CHOLPHATSORN, A., SUEBSUK, J., AND LIU, M. D. (2012). Consolidation behavior of soil–cement column improved ground. *Computers and Geotechnics*, 43, 37–50. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.02.003
- HORPIBULSUK, S., RACHAN, R., CHINKULKIJNIWAT, A., RAKSACHON, Y., AND SUDDEEPPONG, A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2011–2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011
- JAN, O. Q., AND MIR, B. A. (2018). Strength Behaviour of Cement Stabilised Dredged Soil. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 4(2). DOI: 10.1007/s40891-018-0133-y
- KORMANN, A. C. M. (2002). Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: Estudos de Campo e Laboratório. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.2002.tde-20072009-092526

- MOREIRA, E. B., BALDOVINO, J. A., ROSE, J. L., AND LUIS DOS SANTOS IZZO, R. (2019). Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 369–378. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.04.015
- NEMATZADEH, M., ZARFAM, P., AND NIKOO, M. (2017). Investigating laboratory parameters of the resistance of different mixtures of soil – lime – fume using the curing and administrative method. *Case Studies in Construction Materials*, 7, 263–279. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.08.002
- PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, PCA. (1992). Soil-cement laboratory handbook. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- RIOS, S., DA FONSECA, A. V., CONSOLI, N. C., FLOSS, M., & CRISTELO, N. (2013). Influence of grain size and mineralogy on the porosity/cement ratio. *Géotechnique Lett* 2013,3:130–6. DOI: 10.1680/geolett.13.00003
- SIRIVITMAITRIE, C., PUPPALA, A. J., SARIDE, S., AND HOYOS, L. (2011). Combined Lime–Cement Stabilization for Longer Life of Low-Volume Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2204(1), 140–147. DOI: 10.3141/2204-18
- YAGHOUBI, M., ARULRAJAH, A., DISFANI, M. M., HORPIBULSUK, S., DARMAWAN, S., AND WANG, J. (2019). Impact of field conditions on the strength development of a geopolymer stabilized marine clay. *Applied Clay Science*, 167, 33–42. DOI: 10.1016/j.clay.2018.10.005