

Estudo laboratorial da estabilização de um solo argiloso orgânico utilizando diferentes ligantes

Victor Ferreira Núñez
Doutorando, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, vferreiranunez@gmail.com

Andres Mauricio Lotero Caicedo
Professor, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, andreslotero@hotmail.com

Cezar Augusto Burkert Bastos
Professor, FURG, Rio Grande, Brasil, cezarbastos@furg.br

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

RESUMO: A estabilização de solos in situ é antecedida por uma investigação de laboratório para avaliar a dosagem e tipo de ligante que mais se adequam ao solo em questão. Além disso, ligantes pozolânicos apresentam uma taxa de reações mais lenta, que podem inviabilizar esta etapa laboratorial. Uma proposta para avaliação de resistências futuras e aumento da viabilidade do estudo laboratorial é o uso de cura térmica. Solos argilosos orgânicos apresentam dificuldade de estabilização pela interação da matéria orgânica com o ligante adicionado. A estabilização em massa utiliza um aterro de sobrecarga provisório para melhoria da consolidação e cimentação da camada estabilizada, enquanto que a estabilização em colunas, normalmente, não aplica. O trabalho proposto objetiva investigar o uso de um ligante ternário composto por cal de carbureto, escória de alto forno e cimento Portland na estabilização em laboratório pelos métodos em massa e em colunas, com cura térmica, verificando a influência da adição da sobrecarga. Os resultados apontaram que o solo argiloso orgânico estabilizado pelo ligante alternativo proposto apresentou sempre resistências à compressão não confinada maiores que exclusivamente com o cimento Portland, indicando um potencial uso do mesmo. Ademais, o uso da sobrecarga também potencializaram os resultados da cimentação do material.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização de solos, Ligante ternário, Cal de carbureto, Escória de alto forno, Solos orgânicos.

ABSTRACT: In order to evaluate the dosage and binder type, the in-situ soil stabilization is preceded by a laboratory investigation. Furthermore, pozzolanic binders presents a slow reactions rate, that can hinder the feasibility of this laboratory step. The thermal curing emerges as an option to evaluate future strength improving the feasibility of the laboratory study. Organic clayey soils have a difficulty of stabilization due the interaction between organic matter and added binder. The mass stabilization uses a temporary preload fill to improve the consolidation and then the cementation of the stabilized layer. For column stabilization, this preload normally is not employed. The present work aims to investigate the use of a ternary binder composed by carbide lime, ground granulated blast furnace slag and Portland cement in the laboratory stabilization, through mass and column stabilization methods. The influence of preload as also verified. Results pointed that the organic clayey soil stabilized by the proposed alternative binder always presented higher strength than the same stabilized exclusively by Portland cement. This indicates a potential use of the ternary binder in geotechnical works. Moreover, the use of preload also enhanced the cementation results.

KEYWORDS: Soil stabilization, Ternary Binder, Carbide lime, Ground granulated blast furnace slag, Organic soils

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de estabilização de solos são alternativas para construção em obras geotécnicas sobre solos problemáticos. Nestes, incluem-se solos compressíveis, expansivos, passíveis a liquefação, colapsíveis, contaminados, dentre outros. Mitchel (1981) desenvolveu um dos primeiros estados da arte em melhoramento de solos, seguido de importantes trabalhos como o mais recente elaborado por Terashi e Juran (2000). Ambos os trabalhos descrevem o processo de estabilização química de solos como a adição de um agente cimentante ao material a ser estabilizado, normalmente cimento Portland ou cal hidratada. A mistura para estabilização pode ser realizada diretamente em campo, denominada “*in-situ mixing*” ou “mistura no local”. Esta pode ser classificada como mistura rasa ou profunda. Segundo EuroSoilStab (2010), a mistura rasa basicamente é alcançada pela técnica de estabilização em massa, onde uma massa de solo em até 5 metros de profundidade é misturada enquanto é realizada a adição de um agente cimentante, para formar uma seção de solo estabilizado após a cura. Além disso, é recomendada a adição de um aterro de material granular de 1 metro para auxiliar na consolidação do material, resultando em um melhor desempenho mecânico. Já no método de mistura profunda, ou “*deep mixing*”, a estabilização do solo é dada por um trado que penetra no solo em maior profundidade, para posterior adição de um ligante, enquanto o solo é misturado com o mesmo (EUROSOILSTAB, 2010). O resultado então é a formação de uma coluna de solo estabilizado.

O método de estabilização de solos por misturas *in-situ* apresenta um consumo elevado de ligante, o que eleva o custo do procedimento, em termos econômicos e ambientais (FORSMAN et al. 2015). Os impactos ambientais surgem, principalmente, pelo processo de fabricação dos ligantes convencionais que resultam na emissão de altos teores de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO_2). Segundo Davidovits (1991), a produção de 1 tonelada de cimento Portland leva à emissão de 1 tonelada de CO_2 , quando utilizado carvão como combustível. Neste aspecto, surge como possível solução o uso de ligantes alternativos, com base em materiais residuais de processos industriais. A cal de carbureto (CC) é um resíduo oriundo do processo de fabricação do gás acetileno (C_2H_2). É adicionada água ao carbureto de cálcio (CaC_2), gerando além do gás acetileno, o hidróxido de cálcio (cal de carbureto – $\text{Ca}(\text{OH})_2$). É um material que possui propriedades pozolânicas, apresentando boa relação com aluminossilicatos, sendo recentemente utilizado na estabilização de solos (LOTERO, 2020; DASSI-GLI, 2020, CONSOLI et al. 2019a, 2019b, 2019c, 2019d). A escória de alto forno (EAF) é um coproduto do processo de produção de ferro gusa, como etapa do processo de fabricação do aço, no qual são inseridos no alto forno o minério de ferro, o coque, o calcário e dolomita. É um material composto basicamente por óxidos de silício, cálcio, alumínio e magnésio (SALDANHA et al., 2018). Wild et al. (1998) verificaram que a EAF possui hidratação lenta, no entanto, ao ser ativada por cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) apresenta maiores resistências na estabilização de argilas, do que as mesmas estabilizadas apenas por cal ou EAF.

Para otimizar a dosagem do ligante é recomendada uma etapa de estudo laboratorial antes da aplicação em campo. Este fato leva a uma dificuldade quando o ligante a ser utilizado é um ligante pozolânico, que apresenta lentas taxas de desenvolvimento das reações de cimentação, causando um longo período de tempo para análise do ligante. Para aumento da viabilidade desta etapa, pode ser empregada a cura térmica como catalisador das reações.

Este trabalho visa analisar a possibilidade de utilização de um ligante ternário, composto por CC, EAF e cimento Portland na estabilização de uma argila orgânica, por meio de cura térmica, em relação a resposta mecânica do material. Além disso, o presente estudo compara o ligante proposto com um ligante convencional (cimento Portland).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O solo utilizado neste estudo é uma argila orgânica oriunda da cidade de Pelotas-RS. O ponto de coleta do solo é situado na várzea do Arroio Santa Bárbara, caracterizado por uma altimetria próxima a 0 metros em relação ao nível do mar. Durante o período mais chuvoso, o solo encontra-se alagado, com água

superficialmente acumulada. A coloração preta, odor característico forte e plasticidade marcante foram características importantes da argila orgânica, observadas na inspeção tátil-visual (Figura 1a). A distribuição granulométrica do solo está apresentada na Figura 2. O solo foi caracterizado de acordo com sua granulometria, massa específica real, limites de consistência, teor de matéria orgânica e pH, de acordo com suas respectivas normativas. Os resultados e as normativas estão apresentados na Tabela 1. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, SUCS (ASTM, 2017), é classificado como solo orgânico altamente compressível (OH), enquanto pelo sistema classificação da Highway Research Board, HRB (AASHTO, 2017), é classificado como A-7-5(17), grupo dos solos argilosos com comportamento muito ruim como base para pavimento. Solos orgânicos podem ser associados com insucessos no processo de estabilização pela interação entre matéria orgânica e ligante (CHEN e WANG, 2006).

A escória de alto forno utilizada foi disponibilizada por uma empresa produtora de aço na cidade de Vitória/ES. Por tratar-se de uma EAF resfriada bruscamente com água, a mesma possui estrutura granulada muito similar a de uma areia média. Por isso, para maior reatividade, o material foi previamente moído em moinho de bolas com posterior peneiramento na peneira de 45 μm (Figura 1b).

A cal de carbureto utilizada foi obtida próximo a cidade de Porto Alegre-RS, em uma indústria de produção de gás acetileno. Nesta ocasião, a cal resultante se encontra em forma de lama, logo foi seca em estufa por 24 h a 60°C e posteriormente manualmente destorroada e peneirada na peneira de 75 μm , a fim de obter um pó fino (Figura 1c).

Como material comparativo e também componente do ligante ternário foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) (Figura 1d). Em estudos preliminares com a substituição total do CPV a resistência inicial foi baixa. Logo, o uso de uma parcela de CPV no ligante proposto teve o propósito de fornecer ao sistema uma certa cimentação em curtos períodos.



Figura 1. Materiais utilizados na pesquisa: a) solo argiloso orgânico; b) escória de alto forno; c) cal de carbureto; e d) cimento Portland CPV.

2.2 Métodos

Para avaliar o potencial da estabilização *in situ* do solo argiloso orgânico proposto, foi definida uma dosagem para o ligante ternário (LT) com base em testes preliminares realizados pelos autores. Foi verificado que um LT composto por 20% de CPV, 56% de CC e 24% de EAF maximizaram a resistência à compressão não confinada (q_u) do solo estabilizado (NÚÑEZ et al., 2024). A resistência obtida para longo período de cura foi superior à do CPV, mesmo reduzindo o seu consumo em 80%. A metodologia de moldagem utilizada visa representar a estabilização de solos saturados orgânicos em campo, sendo previamente aplicada para este fim (AHNBERG et al., 2001; AXELSSON et al., 2002; LEMOS et al., 2020). Inicialmente o solo é misturado com água, sendo posteriormente adicionado o ligante em pó, seguido de um novo processo de mistura. Então, a mistura solo úmido-ligante é inserida em moldes cilíndricos com material

filtrante na base (geotêxtil). Estes moldes são posicionados em um tanque preenchido com água com objetivo de simular um solo saturado com água sempre disponível no sistema durante o processo de cura. No caso de estabilização em massa, é aplicado 18 kPa de sobrecarga logo após a inserção da mistura no molde, por meio de um peso cilíndrico de aço, a fim de simular o aterro de aproximadamente 1 metro de material granular recomendado (EUROSOILSTAB, 2010; FORSMAN et al., 2015). No caso da estabilização em colunas não há este aterro (exceto quando se deseja um efeito combinado de consolidação e estabilização). Logo, foram moldados corpos de prova com e sem sobrecarga (0 e 18 kPa), para análise da resistência obtida para estabilização em massa e em colunas, bem como da influência da sobrecarga para caso em que a estabilização em massa fosse executada sem o aterro. O teor de ligante adotado foi de 150 kg/m³, dentro da faixa usualmente utilizada para este tipo de estabilização (AHNBERG et al., 2001; AXELSSON et al., 2002; EUROSOILSTAB, 2010; FORSMAN et al., 2015). O teor de umidade utilizado foi de 87%, com base em testes preliminares em que o material teria água o suficiente para possuir características típicas de solos moles, mantendo a estabilidade em um corpo de prova moldado da mesma forma, apenas com solo.

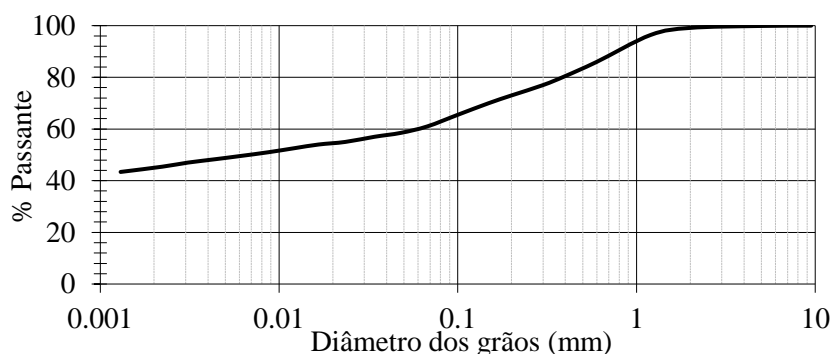


Figura 2. Curva granulométrica do solo.

Tabela 1. Caracterização do solo.

		Referência
Peso específico real dos grãos (kN/m ³)	24,27	Anexo A - NBR 6458
Limite de Liquidez (%)	71	NBR 6459
Limite de Liquidez seco 100°C (%)	49	NBR 6459
Limite de Plasticidade (%)	40	NBR 7180
Índice de Plasticidade (%)	31	-
Teor de Matéria Orgânica (%)	10,52	NBR 13600
Classificação de Solo Orgânico	Solo Medianamente Orgânico	Karlsson e Hansbo (1989)
pH	4,13	D4972
Classificação HRB	A-7-5(17) - Solos argilosos, comportamento muito ruim como camada sob o pavimento	AASHTO M145-91
Classificação SUCS	OH (Solo Orgânico de alta compressibilidade)	ASTM D2487

De modo a agilizar o período de estudo de laboratório da dosagem e da influência do tipo de ligante, foi desenvolvido um equipamento para realizar a cura térmica dos corpos de prova. De acordo com a metodologia de moldagem citada, foi utilizado um termostato conectado a um aquecedor que foi programado de forma a manter em 60±1°C a temperatura da água em que os moldes foram imersos e curados. Em um estudo preliminar dos autores, foi verificado que 10 dias de cura nesta temperatura, equivalem a cerca de 80% da resistência final para 365 dias sob temperatura ambiente (20±1°C). Logo, neste trabalho optou-se por avaliar a resistência do solo estabilizado para 10 dias de cura térmica.

A resposta mecânica do solo estabilizado foi avaliada por ensaios de compressão não confinada em triplicatas. Os ensaios foram realizados em prensa eletro-hidráulica dotada de célula de carga de 5000 kgf e transdutor de deslocamento para avaliação do deslocamento, e posterior cálculo da deformação axial. A

velocidade de carregamento foi de 1 mm/min, de acordo com a norma americana D5102/96 (ASTM, 2004). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Concreto Cláudio Renato Rodrigues Dias, da Universidade Federal do Rio Grande - FURG.

Os resultados foram analisados por meio de um software estatístico para verificação da influência da sobrecarga (0 e 18 kPa) e do tipo de ligante (LT e CPV) na resposta mecânica do solo estabilizado.

3 RESULTADOS

As curvas tensão-deformação das diferentes estabilizações estão apresentadas na Figura 3a, onde “S0” refere-se às misturas sem sobrecarga e “S18” àquelas com 18 kPa de sobrecarga. Na Figura 3b é possível verificar a resistência média para cada uma das misturas. De acordo com os resultados apresentados, é possível observar que a adição de uma sobrecarga induz a uma maior resistência à compressão não confinada, independentemente do tipo de ligante. Este aumento também foi observado em pesquisas anteriores (AHNBERG et al., 2001; EUROSILSTAB, 2010; LEMOS et al., 2020). A presença da sobrecarga facilita a consolidação do solo, gerando uma matriz de solo estabilizado de menor porosidade. Com isso, ocorre a diminuição da distância entre as partículas do ligante, também gerando uma melhor cimentação (AHNBERG et al., 2001; LOTERO, 2020). Isto indica que colunas de solo estabilizado tendem a apresentar uma menor resistência do que massas de solo estabilizado (com emprego da sobrecarga). Além disso, verificou-se que a resposta mecânica do LT proposto foi sempre maior que a do solo estabilizado exclusivamente por CPV. De acordo com estudos anteriores, determinados tipos de ligante podem ser melhores para alguns solos do que para outros, evidenciando a importância da etapa de estudo laboratorial para avaliar o melhor ligante para um dado projeto (AHNBERG et al. 2001, 2003; AXELSSON et al. 2002; NIDZAM e KINUTHIA, 2010).

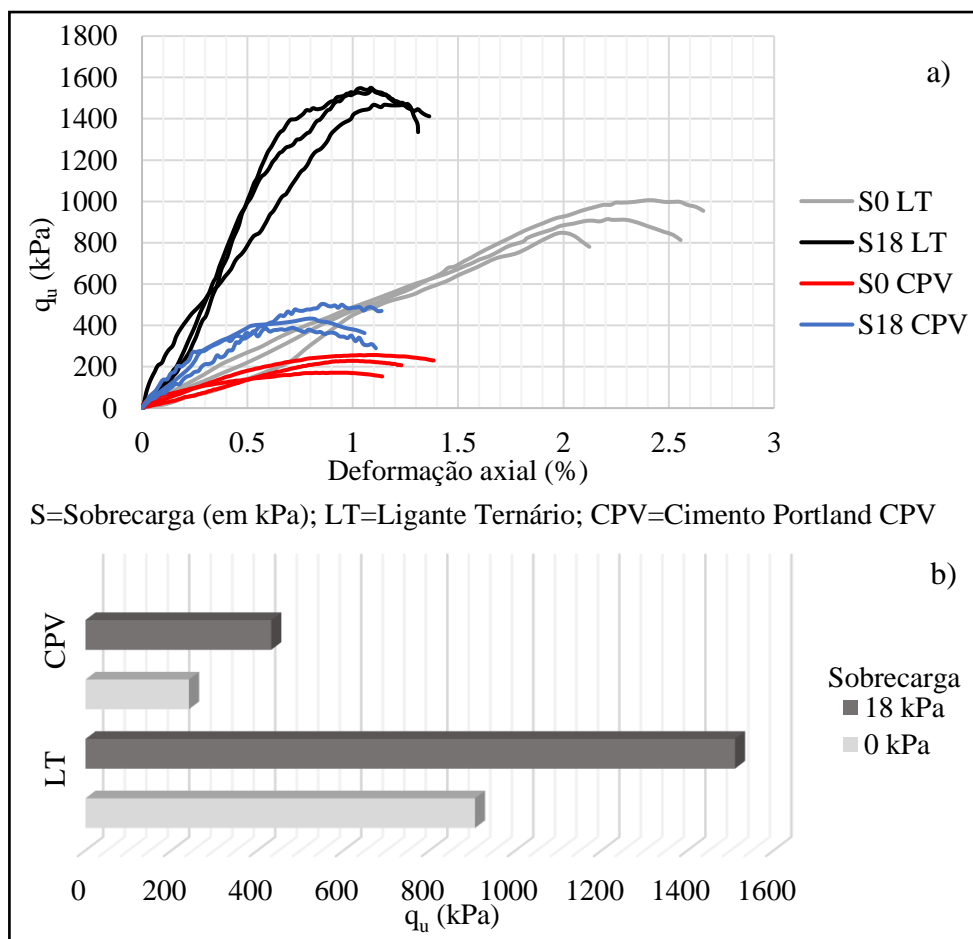


Figura 3. a) Curvas tensão-deformação; e b) Resultado de q_u médio para cada mistura.

O modelo estatístico de análise de variância (ANOVA) confirma a importante significância das variáveis “tipo de ligante” e “sobrecarga” (Tabela 2), que também pode ter esta importância observada no gráfico de pareto (Figura 4). O nível de significância (α) utilizado foi de 0,05 ou 5%. A Figura 5 apresenta o gráfico de efeitos principais para q_u , onde é confirmada a análise feita na tabela ANOVA, sendo q_u maior quando maior o nível de sobrecarga. Ademais, fica evidente a importância do tipo de ligante no desenvolvimento da resposta mecânica do solo estabilizado, sendo o desempenho do LT superior ao do CPV. No gráfico de interação para q_u (Figura 6) verifica-se a significância da interação entre o tipo de ligante e sobrecarga, conforme verificado na tabela ANOVA. A adição da sobrecarga teve um papel fundamental no aumento da resistência do solo estabilizado por LT e CPV, porém com efeito muito mais acentuado no LT.

Tabela 2. Tabela de análise de variância (ANOVA) para q_u .

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P	Signif.
Modelo	3	2881865	960622	300,14	0,00	
Linear	2	2753748	1376874	430,19	0,00	
Tipo de Ligante	1	2278711	2278711	711,96	0,00	Sim
Sobrecarga (kPa)	1	475037	475037	148,42	0,00	Sim
Interações de 2 fatores	1	128117	128117	40,03	0,00	
Tipo de Ligante*Sobrecarga (kPa)	1	128117	128117	40,03	0,00	Sim

S (desvio padrão)=56,5739 kPa

R²=99,12%

R²(ajustado para graus de liberdade)=98,79%

R²(previsto)=98,02%

GL= Graus de liberdade; SQ=Somas ajustadas de quadrados; QM= Média dos quadrados ajustados; Signif=Significância

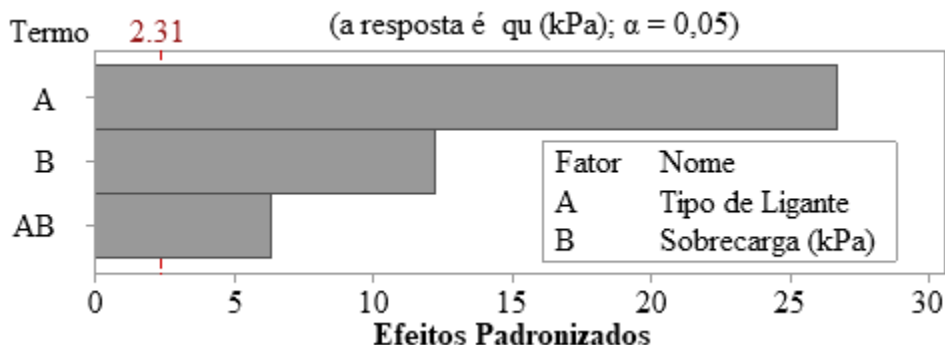


Figura 4. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para q_u .

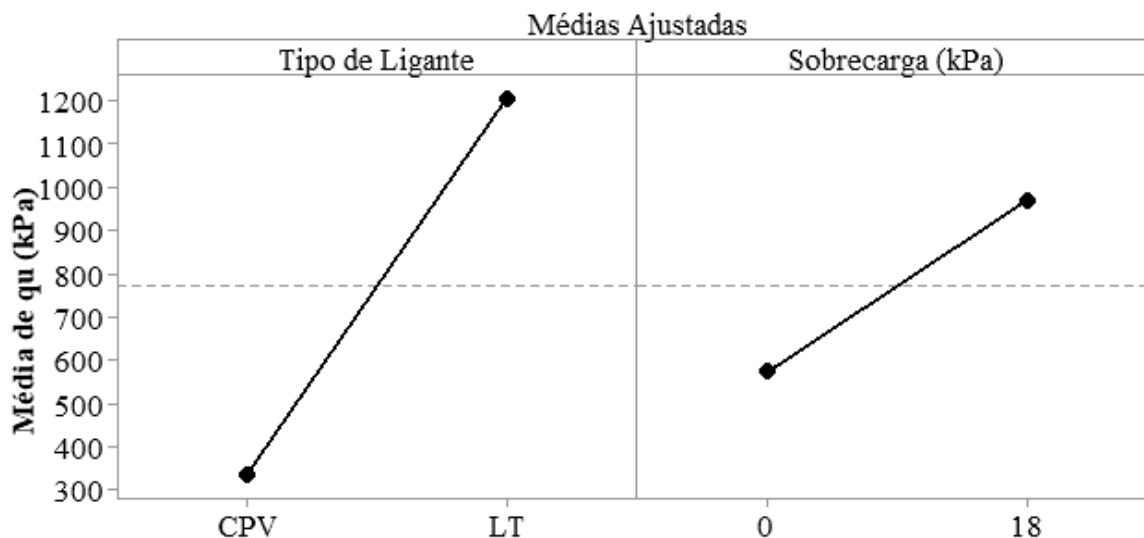


Figura 5. Gráfico de efeitos principais para q_u (kPa).

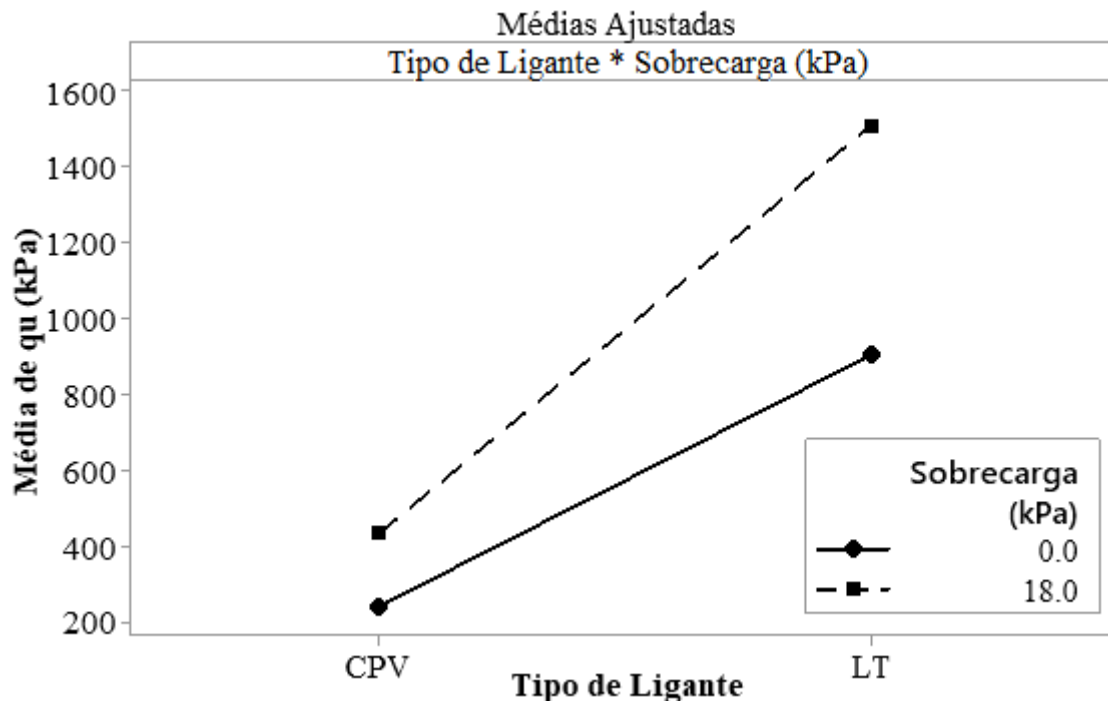


Figura 6. Gráfico de interação para q_u (kPa).

4 CONCLUSÕES

Com base em uma estabilização simulada para longo prazo de cura, o ligante ternário (LT) proposto apresentou resistência bem superior ao cimento Portland (CPV), mesmo com a substituição de 80% do consumo de CPV por dois resíduos industriais. Isto indica um potencial uso de um ligante “mais verde” em obras geotécnicas. Além disso, foi verificada a importância do emprego da sobrecarga no desenvolvimento da resposta mecânica do material. Logo, uma maior resistência é obtida no material estabilizado em massa do que em coluna. Também, fica evidente que quando utilizadas ambas as técnicas em conjunto, o uso do aterro de sobrecarga é fundamental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MCT-CNPq (Editais INCT-REAGEO & Produtividade em Pesquisa) e MEC-CAPES (PROEX), além da Universidade Federal do Rio Grande - FURG e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo suporte ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahnberg, H.; Johansson S.; Pihl, H.; Carlsson, T. (2003) Stabilizing effects of different binders in some Swedish soil. *Ground Improvement*, Vol. 7, 9-27.
- Ahnberg, H.; Bengtsson, P. E.; Holm, G. (2001) Effect of initial loading on the strength of stabilized peat. *Ground Improv* 5:35-40.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017) M145-91. *Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes*.
- ASTM International (2017). ASTM D2487-17e1: *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM International (2004). ASTM D5102: *Standard test method for unconfined compressive strength of compacted soil-lime mixtures*.

- Axelsson, K.; Johansson, S.; Andersson, R. (2002) *Stabilization of organic soils by cement and pozzolanic reactions—feasibility study*. Report 3 Swedish Deep Stabilization Research Centre.
- Chen, H.; Wang, Q. (2006) The behavior of organic matter in the process of soft soil stabilization using cement. *Eng Geo Environ* 65(4):445–448.
- Consoli, N. C.; Marin, J. E. B.; Samaniego, J. A. Q.; Heineck, K. S.; Johann, A. D. R. (2019a) Use of sustainable binders in soil stabilization. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31 (2): p. 1 – 7.
- Consoli, N. C.; Bittar, E. J.; Quiñónez, R. A. (2019b) Effect of mellowing and coal fly ash addition on behavior of sulfate-rich dispersive clay after lime stabilization, *J. Mater. Civ. Eng.*, 31 (6), 04019071.
- Consoli, N. C.; Bittar, E. J.; Quiñónez, R. A.; Heineck, K. S.; Dalla Rosa, A. J. (2019c) Use of sustainable binders in soil stabilization, *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(2): 06018023.
- Consoli, N. C.; Carretta, M. D.; Leon, H. B.; Scheuermann Filho, H. C. S.; Tomasi, L. F. (2019d) Strength and stiffness of ground waste glass–carbide lime blends. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(10).
- Daassi-Gli, C. A. P. (2020) *Estabilização de um solo granular com misturas de pó de vidro-cal de carbureto-hidróxido de sódio (NaOH)*. Dissertação (Mestrado) – PPGE/UFGRS.
- Daviovits, J. (1991) Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, pp. 1633-1656.
- EuroSoilStab (2010) *Design guide: Soft soil stabilization. Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils*. IHS BRE Press ISBN-1860815995.
- Forsman, N.; Jyrävä, H.; Lahtinen, P.; Niemelin, T.; Hyvönen, I. (2015) *Mass stabilization manual*. Finlândia.
- Lemos, S. G. F. P.; Almeida, M. S. S.; Consoli, N. C.; Nascimento, T. Z.; Polido, U. F. (2020) Field and laboratory investigation of highly organic clay stabilized with Portland cement. *J Mater Civ Eng* 32(4):04020063. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003111](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003111)
- Lotero, A. M. *Melhoramento de um solo granular por ativação alcalina de resíduos de cerâmica vermelha e cal de carbureto*. Tese (doutorado) – UFGRS – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
- Mitchell, J. K. (1981) Soil Improvement – State of the art report. *Session 12, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 509-565.
- Nidzam, R. M.; Kinuthia, J. M. (2010) Sustainable soil stabilization with blastfurnace slag – a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Construction Materials*. Vol 163, p. 157-165.
- Núñez, V. F.; Lotero, A. M.; Bastos, C. A. B.; Sargent, P.; Consoli, N. C. (2024) Mechanical and microstructure analysis of mass-stabilized organic clay thermally cured using a ternary binder. *Acta Geotechnica*, 19, p. 741-762. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01961-x>
- Saldanha, R. B.; Scheuermann Filho, H. C. S.; Mallmann, J. E. C.; Consoli, N. C.; Reddy, K. R. (2018) Physical–mineralogical–chemical characterization of carbide lime: an environment-friendly chemical additive for soil stabilization, *J. Mater. Civ. Eng.*, 30 (6).
- Terashi, M.; Juran, I. (2000) Ground improvement – State of the art. *ISRM International Symposium*.
- Wild, S.; Kinuthia, J. M.; Jones, G. I.; Higgins, D. D. (1998) Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilized sulphate-bearing clay soils. *Engineering Geology*, 51, p. 37-53.