

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Avaliação da estabilização química de solo com cimento e etringita por meio do método de dosagem físico-químico

Aléxia Trípodí Ladeira

Estudante, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, alexiatripodi@hotmail.com

Juliana Azoia Lukiantchuki

Professora, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, jalukiantchuki@uem.br

Claudia Telles Benatti

Professora, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil, ctbenatti@uem.br

RESUMO: Em obras de pavimentação, frequentemente torna-se necessário melhorar a capacidade de suporte do solo para resistir ao tráfego. Para isso, utilizam-se diversas técnicas, dentre as quais se destaca a estabilização química com cimento Portland. O teor mínimo de cimento necessário pode ser determinado através do método de dosagem físico-químico. No entanto, considerando a necessidade de se reduzir o impacto ambiental e ainda garantir o desempenho adequado do solo, existe a possibilidade do emprego de resíduos industriais, em substituição ao uso do cimento. Neste contexto, a indústria de anodização de superfícies de alumínio promove a geração de efluentes com alta concentração de sulfato. A redução dessa concentração pode ser obtida através da precipitação da etringita. Assim, neste trabalho foi avaliado o uso da etringita no processo de estabilização química de solos por meio do método de dosagem físico-químico. Os resultados indicaram que não ocorre a interação físico-química das partículas de argila do solo para a mistura solo-ettringita como ocorre com o solo-cimento. Adicionalmente, o ensaio com solo, cimento e ettringita indicou que a curva de variação volumétrica apresenta uma tendência de estabilização com 5% de cimento e 5% ettringita. Esses resultados preliminares indicaram que é possível substituir 1% de cimento por 5% de ettringita.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização química, Efluente industrial, Etringita, Cimento, Dosagem Físico-química.

ABSTRACT: In road construction, soil stabilization is widely used to improving the bearing capacity of the soil in traffic conditions. For this purpose, several solutions are used and the chemical stabilization through cement Portland is widely used. The minimal cement amount can be estimated through the physic-chemical method. However, considering the importance of reduces the environmental impact and ensure the suitable soil behaviour, it can be used the industrial waste, replacing the Portland cement. In this context, the anodizing industry of aluminium surfaces generates an effluent with high concentration of sulphates. The reduction of the concentration of sulphates can be obtained by ettringite precipitation. Thus, this work evaluated the use of ettringite in the chemical stabilization of soils using the physic-chemical method. Results show that isn't occurs the physical-chemical interaction between clay particles of soil in soil-ettringite mixture as occurs in the soil-cement mixtures. Moreover, the soil, cement and ettringite mixture showed that the volumetric variation curve has a trend to stabilization with 5% of cement and 5% of ettringite. These preliminary results show that it is possible to replace 1% of cement for 5% of ettringite.

KEYWORDS: Chemical stabilization, Industrial effluent, Ettringite, Cement, Physic-chemical dosage.

1 Introdução

A utilização do solo como material de construção é uma solução amplamente empregada em projetos geotécnicos sobretudo em obras de pavimentação. Para essa finalidade é ideal que o solo apresente boa durabilidade e resistência mecânica adequada além de se apresentar viável do ponto de vista econômico. Um modo de racionalizar os custos é usando os materiais disponíveis na região, porém eles nem sempre se apresentam tecnicamente adequados.



Nesse contexto, tem-se a estabilização química como uma técnica de melhoria de solos que proporciona o aumento da resistência. Segundo Castro (1981), a técnica consiste na ação da interação química entre os minerais existentes no solo e os aditivos químicos escolhidos. As mudanças que ocorrem no solo devem-se as reações químicas, que são: a floculação, a carbonatação, a químico-adsorção de moléculas de CaOH_2 e as reações pozolânicas, que elevam o pH.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2004) especifica que por meio da dosagem racional é possível estabelecer proporções de solo e cimento que assegurem um produto final resistente e durável. Dentre inúmeros métodos de dosagem, destaca-se o método proposto pela ABCP e o método de dosagem físico-químico (CHADDA, 1971). Segundo Rodrigues (1992) a metodologia proposta pela Associação Brasileira é trabalhosa, pois necessita de tempo, mão de obra qualificada e um laboratório com materiais adequados, sendo que o método de dosagem físico-químico consiste em uma alternativa rápida, simples e eficaz.

O método de dosagem físico-químico, proposto por Chadda (1971) considera a interação físico-química entre as partículas dos argilominerais presentes no solo e as partículas do cimento em hidratação. Assim, o teor mínimo de cimento requerido para estabilizar o solo pode ser estimado indiretamente por meio dessa interação elétrica que ocorre entre o a argila e o cimento (RODRIGUES, 1992). No Brasil, este método foi normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT 414/2019) em que a interação elétrica do cimento com as partículas argilosas do solo, é avaliada por meio de diferentes misturas, com diferentes teores de cimento. Assim, essas misturas quando suspensa em água promovem variações volumétricas e o teor de cimento que resulta na maior variação volumétrica representa o valor indicativo de mistura estável, ou seja, é o teor que estabiliza completamente o solo.

Além dos materiais comumente usados na estabilização química, pode-se também incorporar resíduos em misturas de solo, para além de melhorar o desempenho do solo, ser uma alternativa para destinação adequada desses materiais. Para isso destaca-se ainda que algumas atividades industriais apresentam efluentes com concentração elevada de íons de sulfatos e que quando não tratados adequadamente podem contribuir para a degradação dos mananciais. Dentre as diversas técnicas para a remoção desses íons, Santos et. al (2019) e Molke (2019) concluíram que a remoção de sulfatos, presentes em efluentes provenientes da indústria de anodização de peças de alumínio foi eficaz, quando os íons sulfato precipitam em contato com íons alumínio e cálcio formando a etringita.

Adicionalmente Santos et al. (2019) sugeriram a divisão do processo de tratamento desse efluente em duas etapas. A primeira delas consiste em um pré-tratamento físico-químico cujo resíduo sólido é posteriormente comercializado pela empresa para a produção de sulfato de alumínio. A segunda etapa é o tratamento voltado à redução da concentração de sulfato no efluente final. A etringita, segundo Ayuso e Nugteren (2005), é um sulfato de cálcio e alumínio hidratado ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$) encontrado naturalmente em ambientes alcalinos. Sendo assim a etringita pode ser sintetizada no processo de precipitação química ou como um componente cristalino do cimento Portland hidratado.

De acordo com o exposto, este trabalho propôs a aplicação do método de dosagem físico-químico em misturas de solo, cimento e etringita para avaliar a viabilidade do emprego deste resíduo como forma estabilizar solos lateríticos e posteriormente, em pesquisas futuras, promover a parcial substituição do cimento Portland em misturas de solo-cimento.

2 Procedimentos metodológicos

2.1 Materiais

O solo utilizado nesse trabalho é um solo residual evoluído coletado no município de Mandaguaçu (PR), e que se apresenta amplamente caracterizado por estudos anteriores (Ladeira et. al, 2019). Além do solo foi utilizado o Cimento Portland CP II Z-32.

A produção do subproduto do tratamento do efluente industrial, denominada etringita, foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental da UEM a partir do efluente bruto coletado em uma indústria de anodização de peças de alumínio localizada na cidade de Maringá (PR).

2.2 Metodologia



2.2.1 Produção da etringita

Para produzir a etringita, realizou-se o processo de tratamento do efluente bruto industrial coletado na indústria de anodização de superfícies de alumínio. A produção foi dividida em duas etapas: sendo a primeira o pré-tratamento físico-químico que gera o resíduo sólido posteriormente vendido pela empresa e a segunda o tratamento propriamente dito, no qual reduz a concentração de sulfato no efluente final.

Na primeira fase, primeiramente, calibrou-se o pHmetro e o colocou no efluente, em seguida acrescentou-se NaOH até que o pH estivesse entre 6 e 7 e depois adicionou-se $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ até atingir o pH em torno de 9. Adicionou-se 0,2% do volume de efluente de policloreto de alumínio (PAC) e usando o agitador magnético agitou-se de forma rápida por 5 minutos. O PAC é um sal de alumínio com propriedades de polimerização que não reduz a basicidade do meio. Logo depois diluiu-se o polímero catiônico em água, seguindo a proporção de 3 g de polímero diluído em 1 L de água a cada 360 L de efluente bruto, e o acrescentou na solução para agitar de forma lenta por 5 minutos. Por fim, deixou-se decantar por 24 horas, e então a solução ficou separada em duas fases, na qual a parte inferior é o resíduo sólido que posteriormente será comercializado para produção de sulfato de alumínio e o sobrenadante é o material que continuou sendo tratado (Figura 1a).

Já para a segunda fase, inicialmente, fez-se a análise de sulfato por litro de efluente pelo método turbidímetro (APHA/AWWA/WEF, 2005), e para a síntese da etringita foi necessário adicionar o cloreto de cálcio e o hidróxido de alumínio. A dosagem desses reagentes foi definida a partir da razão estequiométrica de 2:0,4:1 ($\text{Ca}:\text{Al}:\text{SO}_4^{2-}$). Pesou-se esses sais em balança analítica e adicionou-se primeiro o cálcio e depois o alumínio, em seguida, agitou-se a mistura por trinta minutos e novamente deixou-se a mistura decantar por 24 horas. Após esse tempo coletou-se o “clarificado” para análise da concentração de sulfato e o produto decantado (lodo) foi separado. A etringita produzida em forma de lodo foi então colocado em estufa por 24 horas para secagem, e depois foi destorroadada (Figura 1b).



(a) Solução após 24 horas decantando.



(b) Etringita após secagem em estufa.

Figura 1. Produção da etringita.

2.2.2 Ensaio de pH

O ensaio de pH normatizado pela ASTM D4972-01, consiste na pesagem de 20 gramas do material seco ao ar e então adição de 100 ml do líquido (KCl ou água). Em seguida, agitou-se a mistura mecanicamente por 15 minutos e depois de 30 minutos fez-se a primeira leitura de pH, que se repetiu em 60 minutos, 24 horas e 72 horas. Nesta pesquisa o ensaio foi conduzindo determinando-se o pH do solo, e das misturas solo-cimento (com 6% de cimento), solo-etringita (com 6% de etringita) e solo com cimento e etringita (com 3% de cimento e 3% de etringita). Esses valores foram adotados para que fosse possível determinar o pH das misturas usados no ensaio de dosagem físico-químico. As misturas foram preparadas considerando como referência a massa seca (massa de sólidos).

2.2.3 Dosagem físico-química

O ensaio de dosagem físico químico é normatizado pelo DNIT 414:2019, e determina o teor mínimo de cimento necessário para a estabilização completa de um determinado tipo de solo. Consiste na utilização de no mínimo sete provetas de 250 ml, sendo a primeira com solo puro e as restantes com solo e diferentes porcentagens de cimento, definidas em intervalos equidistantes com variação de no máximo 3 pontos percentuais. Nesse ensaio usou-se intervalos de 2 pontos e os teores foram de 2%, 4%, 6%, 8%, 10% e



12%. Em cada proveta, colocou-se 20 gramas de solo, seco até a umidade higroscópica, destorroado e passado na peneira nº10. Adicionou-se e misturou-se o cimento ao solo e logo depois colocou-se aproximadamente 50 ml de água destilada e agitou-se. Em seguida completou-se até o volume de 100 ml da proveta. Após o período de 24 horas, agitou-se a mistura por 30 segundos e 2 horas depois realizou-se a primeira leitura. Repetiu-se esse procedimento até que as leituras fossem constantes ou decrescentes por dois dias seguidos.

Por fim, utilizando a Equação 1 foi possível calcular a variação volumétrica percentual para os diferentes teores e montar um gráfico de porcentagem de cimento *versus* variação volumétrica. O ponto do gráfico da máxima variação volumétrica corresponde ao teor mínimo de cimento requerido para estabilização química do solo analisado. O ensaio foi repetido utilizando a etringita com os mesmos valores de porcentagens por peso de solo usado no ensaio com o cimento, para que fosse possível a comparação. Adicionalmente realizou-se o ensaio da mistura solo-etringita com maiores porcentagens de etringita que variaram de 3 em 3% e foram de 0 a 21%. Por fim, usou-se nove provetas, no qual adicionou-se solo, cimento e etringita, e variou-se a porcentagem desses materiais de 2 em 2 pontos percentuais em relação ao peso de solo, sendo 50% de etringita e 50% de cimento para cada teor estudado. Para esta situação, as porcentagens variaram de 0 a 16% (Figura 2).

$$\Delta V(\%)_{\text{teor}} = \frac{V_{\text{máx (teor)}} - V_{\text{máx (0\%)}}}{V_{\text{máx (0\%)}}} \quad (1)$$

onde:

$\Delta V(\%)_{\text{teor}}$ = variação volumétrica percentual para cada teor de cimento;

$V_{\text{máx (0\%)}}$ = volume máximo lido na proveta para cada teor de cimento;

$V_{\text{máx (0\%)}}$ = volume máximo lido na proveta para solo puro (teor de cimento de 0%).



Figura 2. Ensaio de dosagem físico-química em andamento.

3 Resultados

3.1 Caracterização do solo

Observa-se na Tabela 1 o resumo de alguns resultados dos ensaios de caracterização para o solo residual evoluído de Mandaguaçu.

Tabela 1- Caracterização do solo do município de Mandaguaçu					
Amostra	% de argila	MCT	MO (g/dm ³)	Acb	CTC
Mandaguaçu	26	LA'	1,16	5,02	11,65

nota: MCT é a metodologia MCT, MO é a matéria orgânica, Acb é a atividade de fração de argila, e CTC é a capacidade de troca catiônica.

A escolha desse solo foi baseada no fato de que é um solo laterítico típico da região Noroeste do Paraná e que vem sendo amplamente estudado no Laboratório de Geotecnia da UEM. Em relação a classificação granulométrica, Macedo (2004) apresenta a divisão de dois grupos proposta pela ABCP, no qual solos com até 35% de silte mais argila são considerados favoráveis pois exigem menores quantidades de cimento para



assegurar adequada estabilização, como é o caso do solo de Mandaguaçu que tem 33% de silte mais argila. Quanto ao ensaio Mini MCV, o solo foi classificado como arenoso laterítico (LA').

Os resultados do ensaio de matéria orgânica, indicaram baixa teor de matéria orgânica que segundo Castro (1981), é um fator favorável à estabilização química uma vez que a presença de matéria orgânica impede que o estabilizante reaja com os argilominerais.

Por fim, com o ensaio de adsorção de azul de metileno obteve-se os valores de capacidade de troca catiônica e da atividade da fração de argila. Woollorton (1955) dividiu os minerais de acordo com sua CTC, sendo valores de 3 a 15 meq/100 g, correspondem ao grupo de minerais da caulinita, que o autor explica que são produzidos sob intensa hidrólise ácida e pode caracterizar solos lateríticos. Para a Acb, pode-se classificar a atividade dos argilominerais como pouco ativa e Woollorton (1955) afirma que são requeridas menores porcentagens de cimento para a estabilização de argilas de baixa atividade.

3.2 Ensaio de pH

Observa-se na Tabela 2 a média dos resultados do pH para o solo e para as misturas de solo-cimento, solo-etringita e solo com cimento e etringita.

	Tabela 2- pH das misturas			
	Solo	Solo/Cimento	Solo/Etringita	Solo cimento/etringita
pH (H ₂ O)	4,9	12,1	7,1	11,6
pH (KCl)	4,2	12,2	7,0	11,5

Os valores de pH do solo em água e KCl são os mesmos obtidos por Ladeira e Sandoli (2019). De acordo com esses resultados, classifica-se o solo puro como ácido, porém ao adicionar o cimento, a amostra tornou-se alcalina. Já quando a etringita foi adicionada, apesar de aumentar o pH do solo, ele tornou-se neutro. Por fim, o solo com cimento e etringita também é considerado alcalino.

Mengue et al. (2017) estudaram as características físico-químicas de um solo laterítico tratado com cimento e obtiveram com 6% de cimento um valor muito próximo ao determinado nesse trabalho (pH=12,4). Os autores explicam que o pH alcalino proporciona um ambiente favorável ao desenvolvimento das reações de hidratação do cimento e consequentemente um desenvolvimento adequado da resistência mecânica e citam a pesquisa de Wang e Siu (2006) para explicar que isso ocorre devido a formação de uma matriz solo-cimento floculada, e como consequência a obtenção de uma estrutura compactada.

3.3 Dosagem físico-química

A Figura 3 apresenta a curva de teor de cimento *versus* variação volumétrica, obtida por meio do ensaio de dosagem físico-química, para o solo de Mandaguaçu. Adicionalmente, os valores desta pesquisa são comparados com a curva obtida por Guidelli (2017) para o mesmo solo.

O ponto máximo do gráfico corresponde ao teor mínimo de cimento necessário para estabilizar o solo, portanto para o solo de Mandaguaçu o teor requerido foi de 6%. Os resultados indicaram ainda que para 12% o teor de variação volumétrica foi similar à variação obtida para 6%, entretanto como para 8% e 10% houve um decréscimo dessa variação, torna-se mais coerente o valor de 6% para este solo. Guideli (2017) também observou para o mesmo solo um teor mínimo de 6% de cimento enquanto Ladeira et al. (2019) observaram um teor mínimo em torno de 5%. Desta forma, o valor encontrado é coerente com valores de pesquisas anteriores. Destaca-se ainda que os comportamentos das curvas, apesar da diferença de variação volumétrica, são similares entre si.

A Figura 4 ilustra a curva de teor de etringita *versus* variação volumétrica para o solo de Mandaguaçu, sendo a curva 1 o ensaio de 0 a 12% de etringita com variação de 2 em 2 pontos percentuais e a curva 2 o ensaio de 0 a 21% de etringita com variação de 3 em 3 pontos percentuais. As curvas apresentaram um comportamento bastante particular não indicando tendência à estabilização de variação volumétrica. Observando as curvas verifica-se que até cerca de 8% de etringita as variações volumétricas são praticamente desprezíveis, isto explica a queda observada na Curva 1 para 4% de cimento, resultando em um valor negativo. Portanto, considera-se que não ocorreram variações volumétricas até cerca de 8%. A partir de 9% (Curva 2) e 10% (Curva 1) observa-se que a variação volumétrica começa a ficar evidente, sendo que para



21% (Curva 2) os valores chegaram a 100%. Analisando ambas as curvas, é possível perceber que a tendência de comportamento é a mesma para os dois ensaios realizados.

Comparando a Figura 3 com a Figura 4 é possível perceber que a variação volumétrica da mistura solo-cimento foi maior do que as das misturas de solo-etringita, a interação físico-química dos argilominerais presentes no solo com o cimento proporciona essa expansão e consequente acréscimo volumétrico. Porém em relação à etringita não se observa o mesmo comportamento. Foi observado, ainda, que apesar de ocorrer uma variação volumétrica, as leituras de volume para um mesmo teor de etringita se mantêm constantes ao longo dos dias, ao contrário do que acontece no cimento.

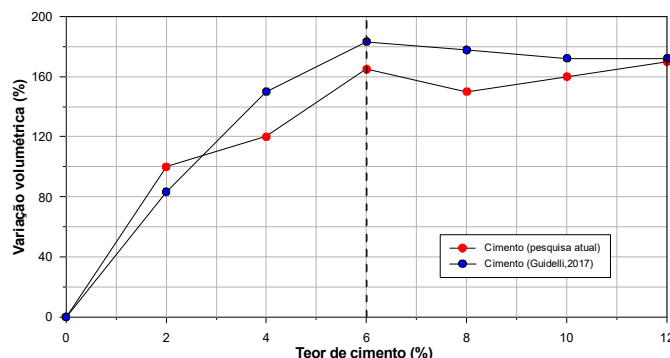


Figura 3. Teor de cimento *versus* variação volumétrica.

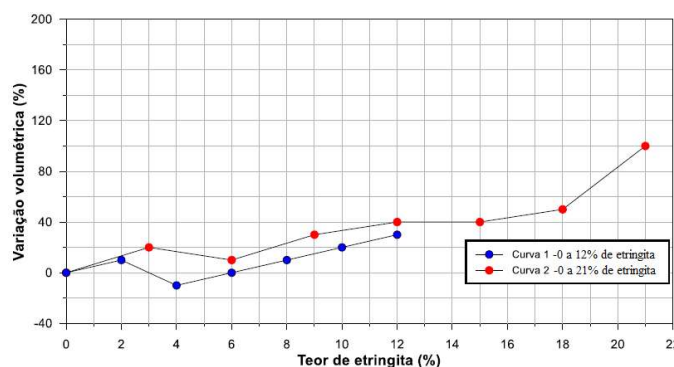


Figura 4. Teor de etringita *versus* variação volumétrica.

A variação volumétrica registrada nas misturas solo-etringita pode estar associada ao contato do material com a água, uma vez que Mehta (1973) explica que a expansão da etringita ocorre quando a mesma entra em contato com a água, pois a grande superfície específica dela e a estrutura cristalina com cargas negativas atraem as moléculas de água que então causam uma repulsão entre as partículas e resultam em uma expansão geral do sistema sem qualquer alteração na estrutura cristalina. Os resultados preliminares deste trabalho indicam que existem fenômenos químicos distintos quando se considera a interação solo-cimento e solo-etringita através do ensaio de dosagem físico-químico.

A Figura 5 apresenta a curva de variação volumétrica do solo com etringita e cimento. O ponto máximo de variação volumétrica ocorreu em 10%, ou seja, 5% de cimento e 5% de etringita, indicando que essa combinação apresenta tendência de estabilização química do solo. Os resultados da dosagem da mistura solo-cimento (Figura 3) indicam que o solo pode ser estabilizado quimicamente com o uso de 6% de cimento. Assim, comparando os resultados (Figura 3 e Figura 5) pode-se inferir que existe a tendência de que 5% de etringita substituiu 1% do cimento. Entretanto, esse resultado ainda deve ser corroborado por meio de ensaios de resistência, já que esse ensaio de dosagem é específico para o cimento puro.

Em relação as leituras de volume da dosagem da mistura solo-etringita e cimento, observou-se que, apesar da leitura de volume das três primeiras porcentagens de solo-cimento e etringita, terem se mantido constantes, as restantes tiveram variação maior do que quando apenas a etringita é adicionada ao solo, porém ainda menor que a variação proporcionada pelo cimento sozinho, portanto pode-se concluir que a adição de etringita causa influência nas reações do cimento com os argilominerais do solo.

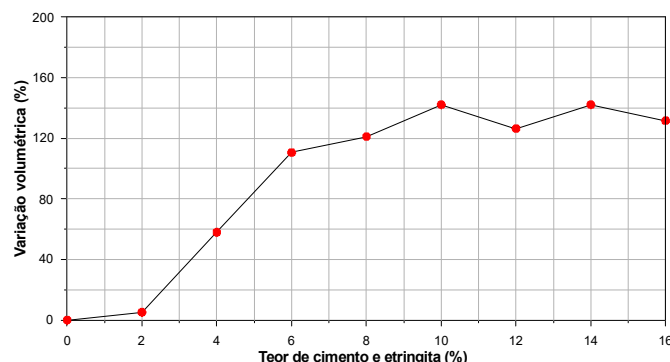


Figura 5. Teor de etringita e cimento *versus* variação volumétrica.

A influência da etringita pode também ser observada na Figura 6, que apresenta a comparação entre a curva solo-cimento e a curva solo-cimento-etringita em função do teor de cimento. Nesta figura, desconsiderando o início da curva (até 2% de cimento), observa-se que para 3, 4 e 5% de cimento as curvas são coincidentes, ou seja, a etringita pouco influencia na interação físico-química entre os argilominerais e o cimento. No entanto, com o aumento do teor de etringita (6 a 8%) as curvas se distanciam, e possivelmente a presença da etringita interfere na interação físico-química. A confirmação deste comportamento deve ser realizada através de ensaios adicionais.

Ainda em relação à Figura 6, a curva para 3, 4 e 5% de cimento são coincidentes e pode indicar uma faixa de melhor eficiência para solos melhorados com cimento usados em vias com menor tráfego e que precisam atingir valores de 1,4 MPa de resistência, sendo então necessário também a realização de ensaios de resistência em pesquisas futuras.

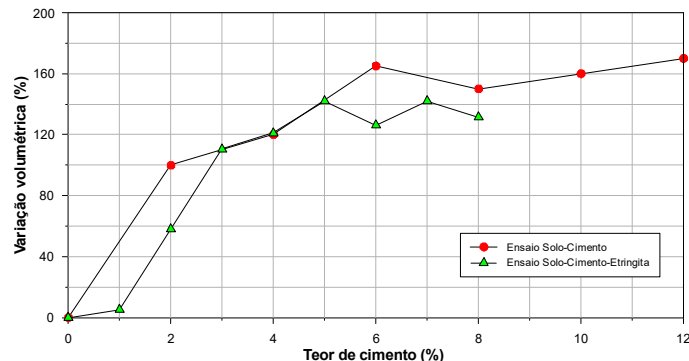


Figura 6. Comparação das curvas de variação volumétrica *versus* teor de cimento.

4 Considerações finais

Em relação aos valores obtidos no ensaio de pH, quando o cimento foi adicionado ao solo, obtém-se um ambiente alcalino e favorável as reações de hidratação do cimento. Já quando a etringita foi adicionada, apesar de elevar o pH do solo puro, não torna o ambiente alcalino. E a mistura de solo, cimento e etringita atingiu um pH de 11,6 resultando então em um ambiente alcalino.

Considerando que a mistura solo com etringita obteve valores de pH neutros e não houve indícios de interação físico química entre os argilominerais do solo e a etringita, não há evidências que a etringita incorporada ao solo puro proporcione a sua estabilização química. Porém quando a etringita foi incorporada juntamente com o cimento, a mistura indicou uma tendência de estabilização com 1% a menos de cimento do que o teor necessário quando se adiciona apenas cimento. Desta forma, os resultados indicam que 5% de etringita pode substituir o uso de 1% de cimento. Logo, essa alternativa se comprovada por ensaios de resistência à compressão simples, realizados em pesquisas futuras, proporcionará uma destinação adequada a etringita direcionando seu emprego para a estabilização química de misturas de solo-cimento. Além disso, a confirmação desse comportamento pode diminuir o consumo de cimento causando menos impacto ambiental.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarés-Ayuso, E.; Nugteren, H. W. (2005) Synthesis of ettringite: a way to deal with acid wastewaters of aluminum anodizing industry. *Water Research*, 39, p.65-72.
- American Public Health Association/ American Water Works Association/ Water Environmental Federation (2005) *APHA/AWWA/WEF Standard method for the examination of water and wastewater*, Washington.
- American Society for Testing and Material (2019). ASTM D4972-1 *Standart test method for pH of soils*. Pennsylvania.
- Associação Brasileira de Cimento Portland (2004). ABCP *Dosagem das misturas de solo cimento, normas de dosagem e métodos de ensaio*. São Paulo.
- Castro, F. J. C. O. (1981) *Um estudo físico-químico-matemático da estabilização alcalina de solos argilosos*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE/UFRJ, 631 p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2019). DNIT 414. *Pavimentação- Solo-Cimento- Dosagem físico química de solo-cimento-Método de Ensaio*. Brasília.
- Guideli, L. C. (2017) *Avaliação do comportamento de misturas alternativas de solo, cimento e pó de pedra para aplicação em pavimentação*. Trabalho de Conclusão de curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá / UEM, 89 p.
- Guimarães, J. E. P. (1997) *A Cal-Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil*, Pini, São Paulo, BR, 341 p.
- Ladeira, A. T.; Sandoli, M. A. M.; Lukiantchuki, J. A.; Oliveira J. R.; Ildefonso, J. S. (2019) Caracterização física, química, mineralógica de solos típicos do Noroeste do Paraná para fins de aplicação em obras geotécnicas. In: *Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul- GEOSUL 12*, Joinville. Anais... ABMS, p. 1-11.
- Macedo, M.M. (2004) *Solos modificados com cimento-Efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pernambuco / UFPE, 309 p.
- Mehta, P. K. (1973) Mechanism of expansion associated with ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 3, p.1-6.
- Mengue, M.; Mroueh, H.; Lancelot, L.; Eko, R. M. (2017) Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement. *Soils and Rocks*, 57, p.60-79.
- Molke, A. S. (2019) *Remoção de sulfato a partir de efluente industrial, por meio de precipitação química*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá / UEM, 139 p.
- Rodrigues, M. G. M. (1992) *Contribuição ao estudo do método físico-químico de dosagem de solo-cimento*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE/UFRJ, 204 p.
- Santos, G. M. R.; Syllos, R. S.; Benatti, C. T. (2019) Estudo da precipitação química para remoção de sulfato de efluente de anodização. In: *Encontro Anual de Iniciação científica*, 28, Maringá. Anais... EAIC UEM, p.1-4.
- Wang, Y. H.; Siu, W. K. (2006) Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 43, p.587-600.
- Wooltorton, F. L. D. (1955). Engineering Pedology and soil stabilization. *Highway Research Board*, v.107, p. 29-57.