

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

NATHALIA SOUZA DOMINGOS DA COSTA

**PRECIPITAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO POR INDUÇÃO DE
ENZIMAS COMO SOLUÇÃO CIMENTANTE PARA ESTABILIZAÇÃO
DO SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2016

NATHALIA SOUZA DOMINGOS DA COSTA

**PRECIPITAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO POR INDUÇÃO DE
ENZIMAS COMO SOLUÇÃO CIMENTANTE PARA ESTABILIZAÇÃO
DO SOLO**

Trabalho apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Coordenação de Engenharia Ambiental – COEAM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Campo Mourão, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Cleide Baldo
Co-orientadora: Alizée M. Jenck (Pesquisadora de mestrado do Biodesign Institute na instituição Arizona State University)

CAMPO MOURÃO
2016



TERMO DE APROVAÇÃO

PRECIPITAÇÃO DO CARBONATO DE CÁLCIO POR INDUÇÃO DE ENZIMAS COMO SOLUÇÃO CIMENTANTE PARA ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

por

NATHALIA SOUZA DOMINGOS DA COSTA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em **24 de Junho de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr.^a. Maria Cleide Baldo
Prof. Orientador

Dr.^a. Flavia Vieira da Silva Medeiros
Membro titular

Dr. Jose Hilton Bernardino de Araújo
Membro titular

*“O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do
Curso de Engenharia Ambiental”*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Rosinéa de Souza Cordeiro e Dinalmo Domingos da Costa, e a minha tia Terezinha Batista de Souza pelo apoio, ajuda e confiança em mim depositado, na decisão de morar em outro estado para iniciar meus estudos de graduação, e em todos os momentos decisivos de minha vida. A eles todo meu amor, admiração e respeito.

A toda a minha família, que direta, ou indiretamente contribuíram para a minha formação.

Ao programa do Governo Federal Ciência sem Fronteiras, a CAPES e ao CnPq pela bolsa de graduação sanduiche concedida, para a realização de estudos no exterior, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

A instituição Arizona State University que me acolheu e me proporcionou contato com ótimos profissionais na área da educação e tecnologia de ponta na área de pesquisa.

A minha orientadora Alizée M. Jenck pela amizade e confiabilidade em mim para fazer parte de um projeto tão inovador, e por todo o conhecimento adquirido.

A minha orientadora Dr. Maria Cleide Baldo pelos conselhos, orientações, conversas e o apoio dados durante , não só a época da realização do TCC, como durante toda a graduação e projeto de Iniciação Científica.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Hilton Araújo e Dr. Flávia Medeiros pelas contribuições e consequente melhoramento deste trabalho.

A todos os professores da coordenação de Engenharia Ambiental que me deram o suporte técnico científico, e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – câmpus Campo Mourão pelo espaço e recursos cedidos para a minha formação.

A todas as amigas adquiridas nestes 5 anos de curso, por estarem ao meu lado me apoiando, ajudando, aconselhando e formando uma espécie de família, tornando os dias na universidade, e fora dela, mais felizes. Agradecimento especial ao amigo Pedro Ivo (Mato Grosso), que me ajudou na entrega do TCC, e sempre me tratou como uma irmã.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

Muito obrigada!

“O mundo não será destruído por aqueles que fazem o mal,
mas por aqueles que os olham e não fazem nada.”

(Albert Einstein)

RESUMO

COSTA, Nathalia S. D. da. **Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante para estabilização do solo**. 2016. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2016.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi fundamentar a utilização da enzima urease, derivada de produto agrícola, na precipitação do carbonato de cálcio (EICP), como um método eficaz para estabilização do solo. Esse processo utiliza cloreto de cálcio, ureia, e a enzima urease, para induzir precipitação de carbonato no solo, que por sua vez preenche os espaços vazios agindo como uma solução cimentante, apresentando muitos benefícios, incluindo um aumento na resistência ao corte e um aumento da resistência à fenômenos como o da liquefação. Outras substâncias muito utilizadas para fins de melhoramento das propriedades mecânicas do solo, são a goma guar e bentonita sódica, também estudadas neste trabalho. Para tanto, foram realizados testes de bancada em dezoito colunas de acrílico, produzidas com intuito de realizar ensaios de bombeamento para verificar o coeficiente de permeabilidade ao longo dos meses de maio, junho e julho de 2015, durante treze semanas, em que o teste de permeabilidade foi realizado toda quinta-feira. As colunas foram preenchidas com o solo e as substâncias de forma que três colunas continham o carbonato de cálcio precipitado e foram deixados à temperatura ambiente do laboratório (24 °C); outras três continham a mesma substância, porém foram deixadas na estufa à temperatura de 45 °C. Quatro delas tiveram o solo misturado, além da técnica de precipitação do carbonato de cálcio, à bentonita, sendo que duas foram deixadas à temperatura de 24 °C a duas à temperatura de 45 °C. Uma das colunas foi submetida à EICP e foi misturado à goma guar; outra, além de EICP, teve seu solo misturado com bentonita e goma guar. Na décima terceira coluna, o solo foi misturado apenas à bentonita; já a décima quarta apenas à goma guar; e na décima quinta misturado a goma guar e bentonita juntas. Outras três colunas serviram como controle, ou seja, o solo não foi misturado a nenhuma substância. Todas estas foram testadas em condições estáticas, visando reproduzir em menor escala uma situação real. Os resultados dos ensaios realizados indicam que a técnica de precipitar o carbonato de cálcio no solo através da ação da enzima urease de fonte agrícola é eficiente para diminuir a permeabilidade do solo, principalmente quando misturada à goma guar, nas colunas à 24 °C. No geral, nenhuma técnica apresentou maior eficiência na redução da permeabilidade separadamente, quando comparadas à utilização de duas ou mais técnicas combinadas. Vale ressaltar que EICP, prolongou os resultados desejados de cimentação das substâncias já conhecidamente empregadas para fins de cimentação, goma guar e bentonita sódica, que quando utilizadas separadamente no solo, perderam a eficiência com o passar dos meses. Isto indica que a utilização destas técnicas requer planejamento, visto que, cada substância utilizada deve ser avaliada de acordo com a finalidade, o grau de impermeabilidade desejado, clima local, e outros fatores que venham a influenciar.

Palavras-chave: Precipitação do carbonato de cálcio no solo. Enzima urease de fonte agrícola. Solução cimentante. Coeficiente de permeabilidade.

ABSTRACT

COSTA, Nathalia S. D. da. **Precipitation of calcium carbonate by induction of enzymes as a cementitious solution for soil stabilization.** 2016. 45 p. Completion of Course Work (Bachelor of Environmental Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Campo Mourão, 2016.

The purpose of this course conclusion paper was to justify the use of the enzyme urease derived from agricultural product, on the precipitation of calcium carbonate (EICP) as an effective method for soil stabilization. This process uses calcium chloride, urea and the urease enzyme to induce carbonate precipitation in the soil, which in turn fills the voids acting as a cementitious solution, with many benefits, including an increase in shear strength and increased liquefaction resistance. Other substances widely used for the purpose of improving the mechanical properties of the soil are guar gum and bentonite in sodium form, also studied in this work. Therefore, laboratory tests were performed in eighteen acrylic columns, produced with the intention of performing pumping tests to check the permeability coefficient over the months of May, June and July 2015, for thirteen weeks where the permeability test was held every Thursday. The columns were filled with soil and the substances so that three columns contained the precipitated calcium carbonate and were left at 24 °C of temperature; other three contained the same substance, but were left in the oven at 45 °C temperature. Four of them had the soil mixed with EICP and bentonite, where two were left at 24 °C and two were left in the oven at 45 °C. One column was submitted to the EICP procedure and was mixed with guar gum; and other with EICP, bentonite and guar gum together. The thirteenth column was mixed just to bentonite; the fourteenth column had only guar gum; and fifteenth was mixed with guar gum and bentonite together. Other three columns served as control, i.e., the soil was not mixed with any substance. All of these columns were tested under static conditions in order to reproduce on a smaller scale a real situation. The results of the test indicate that the technique of precipitate calcium carbonate in the soil through urease enzyme action is effective to reduce permeability of the soil, especially when mixed with guar gum in columns at 24 °C. Overall, no technique was more efficient in reducing the permeability separately compared to the use of two or more techniques combined. It is noteworthy that EICP, continued the desired cementing results of substances already known to be used for cementing purposes, guar gum and sodium bentonite, those which when used separately on the ground, lost efficiency over the months. This indicates that, the use of these techniques requires planning, since each substance used must be evaluated in accordance with the purpose, the desired degree of impermeability, local weather, and other factors that may influence.

Keywords: Precipitation of calcium carbonate in the soil. Enzyme urease from agricultural source. Cementitious solution. Permeability coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático da coluna utilizada para o experimento.....	19
Figura 2 - Colunas na estufa à temperatura de 45°C.....	23
Figura 3 - Colunas à temperatura ambiente de 24°C.....	24
Figura 4 - Demonstração do ensaio de permeabilidade com carga variável.....	25
Figura 5- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas de controle (16, 17 e 18) e as contendo solo com carbonato de cálcio precipitado (1, 2 e 3).....	30
Figura 6- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetidos à técnica EICP com diferença de temperatura.....	31
Figura 7- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo misturado ao carbonato de cálcio e bentonita sódica com diferença de temperatura.....	33
Figura 8 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo com carbonato precipitado apenas e o solo contendo carbonato de cálcio precipitado e bentonita sódica. a) 24 °C de temperatura, b) 45 °C de temperatura.....	34
Figura 9 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetido à técnica de precipitação do carbonato de cálcio (1, 2 e 3), carbonato de cálcio e bentonita sódica (7, 8), carbonato de cálcio e goma guar (11), carbonato de cálcio, bentonita sódica e goma guar (12).....	35
Figura 10 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade. a) Colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado e goma guar (11) e apenas goma guar (14), b) Colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado e bentonita sódica (7 e 8) e apenas à bentonita (13).....	36
Figura 11 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado, bentonita sódica e goma guar (12) e solo misturado à apenas bentonita sódica e goma guar (15).....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento experimental das colunas de acordo com composição e temperatura.....	22
Tabela 2 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.....	26
Tabela 3 - Valores utilizados para os cálculos dos coeficientes de permeabilidade.....	27
Tabela 4 -Valores obtidos com os cálculos do coeficiente de permeabilidade semanalmente durante três meses em todas as dezoito colunas.....	29

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	11
2.1 OBJETIVO GERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1 O MÉTODO E SUAS E APLICAÇÕES	12
3.2 REAÇÃO QUÍMICA ENVOLVIDA NO PROCESSO.....	14
3.3 FATORES LIMITANTES	15
3.4 OUTRAS SUBSTÂNCIAS E SUAS APLICAÇÕES	16
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4.1 APARATO EXPERIMENTAL.....	18
4.2 SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO	20
4.3 SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS UTILIZADAS	20
4.4 ORGANIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS COLUNAS	22
4.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
6 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O manejo adequado para a potencialização do uso do solo é fundamental, visto que cada formação pedológica tem suas características e aptidões distintas, porém as atividades de um determinado local podem não ser compatíveis com a capacidade de produtividade do solo e sua conservação.

A ocupação territorial inapropriada somada à vulnerabilidade do solo pode acarretar em uma série de riscos ao ecossistema como: erosão, poluição, assoreamento de rios e perda da biodiversidade, configurando-se nos principais problemas decorrentes da falta do planejamento geoambiental. Para mitigar e prevenir os impactos ambientais, o manejo adequado do solo permite a exploração dos recursos naturais com sustentabilidade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2003). Sendo assim, a aplicação do estudo de uso e conservação dos solos é necessária para a exploração dos recursos naturais, visando à diminuição da perda da qualidade físico-química e biológica do solo.

Para melhoramento das propriedades mecânicas do solo no que se refere ao aumento da resistência ao corte, incremento de capacidade de carga e estabilização, por exemplo, as técnicas mais utilizadas são compactação dinâmica e por explosivos, mistura mecânica, compactação por meio de rolo compactador, vibrocompactação por introdução de agulha vibratória e estacas cravadas. Outras técnicas envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose, que melhoram as características estruturais e de drenagem dos solos (RIBEIRO, 2010).

Nota-se que, geralmente, as técnicas mais comuns envolvem utilização de maquinários pesados e grande consumo de energia. Porém, quando passa-se a ver o solo como um organismo vivo, percebe-se a possibilidade de soluções mais sustentáveis para melhora do solo com o auxílio de químicos e material biológico para desenvolver novas técnicas, chamadas de bio-geotecnologias (DEJONG, et. al. 2011).

Uma técnica que vem sendo utilizada e desenvolvida por pesquisadores é a utilização da hidrólise da ureia para induzir a precipitação de carbonato de cálcio no solo. Esta técnica envolve o uso de cloreto de cálcio, ureia, e algum tipo de enzima urease, derivada de plantas ou microorganismos, para induzir a precipitação de carbonato e assim cimentar os grãos de solo juntos. A cimentação que ocorre devido a este processo tem muitos benefícios, incluindo

um aumento na resistência ao corte e um aumento da resistência à fenômenos como o da liquefação (KNORR, 2014). Além disso, a cimentação também pode ser benéfica quando é necessário diminuir a permeabilidade do solo, como em algumas obras de engenharia, em que os mais sérios problemas de construção estão ligados à presença da água, ou seja, a informação da permeabilidade e de sua variação é fundamental para a solução desses problemas (PAZZETTO, 2009).

Grande parte das pesquisas com relação à hidrólise da ureia como um processo de melhoria do solo emprega a urease microbiana. Esta método é comumente chamado de Precipitação do Carbonato Induzida Microbiologicamente (MICP) e muitos trabalhos mostram que a técnica tem grande eficácia na biocimentação para tratamento de solos contaminados (BONATTO et al., 2014), minimização da liquefação e melhoramento das propriedades do solo (MONTROYA et al., 2013; MONTROYA et al., 2012 e WHIFFIN et al., 2007), melhoramento do terreno para estabilização ferroviária (VAN PAASSEN, 2009), sequestro de radionuclídeos e metais contaminantes (HAMDAN, 2013) e controle da erosão (MEYER et al., 2011).

Outra técnica, ainda pouco explorada por pesquisadores, é a que utiliza a enzima urease derivada de plantas. Esta técnica é chamada de Precipitação do Carbonato de Cálcio por Indução de Enzimas (EICP) e é semelhante à MICP, a não ser pelo fato de que, ao invés de empregar microrganismos para obter a enzima urease, esta é obtida a partir de fontes agrícolas como feijões, melão e abóbora, onde são usualmente encontradas. (KAVAZANJIAN; HAMDAN, 2015).

Diante do exposto acima, o presente trabalho tem como objetivo fundamentar a aplicação da ureia derivada de produto agrícola na técnica de EICP em solo arenoso como um método eficaz de estabilização do solo empregando ensaios de permeabilidade baseados na Lei de Darcy.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Fundamentar o emprego da enzima urease, derivada de produto agrícola, na precipitação do carbonato de cálcio, como um método eficaz para estabilização do solo e solução cimentante, empregando ensaios de permeabilidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a eficiência da enzima urease, mais precisamente da planta leguminosa *Canavalia ensiformis* (L), como solução cimentante na precipitação do carbonato de cálcio;
- Confeccionar dezoito colunas, em que serão realizados o experimento, para elaboração de diferentes cenários como a diferença de temperatura entre as colunas, a efeito de comparação;
- Realizar ensaios de permeabilidade, para calcular, através da Lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade, permitindo verificar o potencial de adensamento provocado pela técnica;
- Constatar se a adição das substâncias cimentantes, goma guar e bentonita sódica, aumentam o poder cimentante da enzima.
- Constatar qual das substâncias apresentou maior eficiência baseado nos valores de permeabilidade obtidos ao longo do tempo do experimento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O MÉTODO E SUAS E APLICAÇÕES

A precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas é uma técnica de estabilização mecânica do solo que se insere no campo da bioengenharia, que é uma área relativamente novo na área da engenharia geotécnica, que emprega a biotecnologia à processos já conhecidos na mecânica de solos. As técnicas desta área de estudo têm adquirido a atenção de engenheiros geotécnicos nos últimos anos, em que estes tomaram conhecimento de que a mecânica dos solos sozinha era insuficiente para resolver muitos problemas práticos.

Em um trabalho realizado por Mitchell (1975) sobre o comportamento do solo, foi reconhecido o importante papel que a química desempenha no comportamento das frações minerais do solo. A partir daí, a ideia da biotecnologia aplicada à engenharia geotécnica começou a disseminar-se no campo da pesquisa desta área, e em 2005, a bioengenharia geotécnica foi identificada como um importante tópico de pesquisa do Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos. O principal tema de interesse nestes estudos foi a melhoria do solo por meio da precipitação de carbonato de cálcio induzida pela enzima urease derivada de microorganismos, conhecida como MICP, que é o foco da maioria das pesquisas na atualidade (DEJONG et al, 2013).

A chamada biomineralização, causada pelos microorganismos, pode ser dividida em três metodologias de interesse da construção civil: a bioinduração, a biorremediação e a bioestabilização. A bio-induração consiste na técnica mais estudada e caracteriza-se pela selagem dos poros do solo mediante a adição de microorganismos, para que estes produzam um biofilme constituído por uma matriz de polímeros extracelulares, com intuito de reduzir a permeabilidade do solo. A bio-remediação consiste em usar a precipitação de carbonato de cálcio para restauração de concretos e de monumentos de pedra. E a bioestabilização tem como objetivo a melhoria das propriedades geotécnicas dos solos por meio da secreção ou precipitação de substâncias cimentantes como o carbonato de cálcio (GÓMEZ, 2006).

A origem da enzima urease pode ser também de fontes agrícolas, que por sua vez oferece vantagens em comparação à urease microbiana. Nesta técnica, não há necessidade de manter e crescer microorganismos, que por sua vez, utilizam o carbono na reação da hidrólise

da ureia como fonte de alimento, limitando a eficácia total do carbono, que vai para a produção de carbonato. A urease derivada de fontes agrícolas também é prontamente disponível para compra, e degrada-se após ser utilizada, diferentemente da urease microbiana em que os microorganismos permanecem no substrato (KNORR, 2014).

Em 2013, o professor Edward Kavazanjian e seu aluno assistente Nasser Hamdan da instituição de ensino norteamericana Arizona State University, patentaram a invenção de um método de precipitação mineral para aplicação na engenharia geotécnica que compreende a combinação de um material poroso com urease isolada, ureia, e uma fonte de cátions bivalentes (KAVAZANJIAN; HAMDAN, 2013).

A utilização da hidrólise da ureia foi proposta como uma técnica de engenharia no início dos anos 1990, quando era chamada de "Carbonate in Place" (CIP), como um método para a recuperação de óleo na indústria de petróleo. Neste método o carbonato produzido pela hidrólise de ureia era utilizado para entupir espaços vazios no solo em torno de uma unidade de perfuração de petróleo, assim, o entupimento dos poros em torno da broca fazia com que o óleo fluísse para fora do orifício perfurado, e não escorresse lateralmente no solo (NEMATI; VOORDOUW, 2005). Após o desenvolvimento da CIP, a precipitação de carbonato a partir da hidrólise da ureia foi utilizado numa variedade de outras aplicações, incluindo a recuperação de materiais de pedra calcária (RODRIGUEZ NAVARRO et al., 2003), biorremediação (FERRIS, 2003), tratamento de águas residuais (HAMMES et al., 2003), e fortalecimento de concreto (RAMACHANDRAN et al., 2001).

Segundo Kavazanjian e Hamdan (2013) estes métodos podem ser aplicados para melhoria da capacidade de carga das fundações, estabilização de encostas, redução do potencial de assentamento das fundações ou aterros, redução do potencial de liquefação induzida por terremotos, aumento da resistência lateral de fundações, reforço da estabilidade de taludes ou aterros, aumento da resistência lateral e resistência de ponta de fundações profundas, estabilização de escavações profundas, controle da erosão do solo, controle de águas subterrâneas, sequestro de contaminantes, alternativa ao cimento Portland, dentre outros. Entretanto, apenas mais recentemente, o foco na aplicação desta técnica foi no campo da engenharia geotécnica.

3.2 REAÇÃO QUÍMICA ENVOLVIDA NO PROCESSO

Existem diversas maneiras de induzir a precipitação de carbonato em solos. Alguns métodos incluem a desnitrificação, redução de sulfato, indução da precipitação de dolomita e redução do ferro, no entanto, a hidrólise da ureia é a mais eficiente de todos estes processos (DEJONG et al, 2013). Esse processo utiliza cloreto de cálcio, ureia, e a enzima urease, para induzir precipitação de carbonato no solo, que por sua vez preenche os espaços vazios agindo como uma solução cimentante.

Quando o cloreto de cálcio e ureia, são misturados em conjunto, formam um composto estável e sem ocorrência de reação. O ingrediente que impulsiona o processo de cimentação é a enzima urease (KNORR, 2014).

A precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzima ocorre pela reação da enzima urease, em solução, com cloreto de cálcio e ureia. O cloreto de cálcio (CaCl_2) é um sal e é a fonte de cálcio para o carbonato de cálcio precipitado. A ureia (H_2NCONH_2) atua como fonte de hidrogênio fornecendo a energia necessária para hidrólise da urease (ATKINS; JONES, 2006).

A enzima urease derivada de fonte agrícola, principalmente a proveniente da leguminosa *Canavalia ensiformis* (L.) DC, o feijão de porco, é ideal para este tipo de experimento, mesmo quando em baixas concentrações, pois como constatado por Muñetón (2009), que averiguou um acréscimo de pH instantâneo pela mudança de cor do extrato contendo a enzima, indicando uma alta atividade ureásica.

A precipitação do carbonato de cálcio é uma reação de duas etapas. Na primeira reação (1) a enzima urease catalisa uma reação com a ureia e água que produz amônio e íons carbonato. Esta primeira reação aumenta o pH da solução, o que cria um condição ideal para a precipitação de carbonato (MEYER et al., 2011).



Os produtos de NH_4 e CO_3 desta reação representam o produto final da série de reações, visto que, o amônio, que é um ácido, começa como NH_3 (amônia). Quando a amônia reage com água, cria-se íons OH^- , que aumentam o pH do sistema, causando a especiação do

carbonato, ou seja, quando o pH é elevado, torna-se mais propensa a produção de carbonato (CO_3^{2-}) (KNORR, 2014).

Uma vez que a primeira reação está terminada, a reação (2) começa.



Esta reação combina os íons de cálcio (Ca^{2+}) do cloreto de cálcio e os íons carbonato (CO_3^{2-}) da primeira equação (1) para obter o carbonato de cálcio, que precipita a partir da solução, quando o pH e teor de carbonato são suficientemente elevados (MEYER et al., 2011).

3.3 FATORES LIMITANTES

Apesar dos grandes avanços e aplicações da técnica de precipitação de carbonato através de enzimas, ainda há fatores limitantes sobre seu uso, que requerem investigação.

A enzima extraída de fontes agrícolas tem um alto custo quando adquiridas em pequenas quantidades de um fornecedor de materiais de laboratório, sendo desconhecido o custo de produção em larga escala. Outros fatores consistem na padronização de concentrações adequadas da utilização de cada componente, por ser uma técnica ainda pouco estudada e possuir vasta bibliografia sobre o tema, durabilidade do processo na prática e a resistência à água superficial e a real influência do processo sobre a magnitude de escoamento de águas superficiais (KNORR, 2014).

Além disso, há uma particular preocupação ambiental em relação à hidrólise da ureia no processo, pois esta gera subprodutos como amônia ionizada ou amônio (NH_4^+) e amônia livre (NH_3) (KNORR, 2014). Dependendo da finalidade da utilização da técnica, como para conter erosões no solo, por exemplo, o amônio é potencialmente prejudicial pela possibilidade de lixiviar para corpos d'água, contaminando-os. A amônia, na sua forma livre, também é tóxica na biota aquática, tendo sua absorção facilitada pela permeabilidade nas membranas celulares dos peixes e, também, por formar complexos de metais pesados de propriedade ecotoxicológica, além de possuir forte odor (ALVES, 2006).

A destinação destes subprodutos deve ser controlada, pois além de seu potencial efeito poluidor sobre o meio ambiente, a presença de amônia nos recursos hídricos implica em maior demanda de cloro no tratamento de água de abastecimento, podendo gerar subprodutos tóxicos como as cloraminas e compostos orgânicos voláteis (BELLIDO, 2003).

3.4 OUTRAS SUBSTÂNCIAS E SUAS APLICAÇÕES

Há diversas técnicas disponíveis para contenção e remediação do solo, que estão sendo empregadas para resoluções de problemas como melhora da resistência mecânica do solo e impedimento da disseminação de contaminantes. A escolha do método apropriado constitui um processo que deve considerar as características do local, do problema a ser remediado, e um estudo da viabilidade técnico-econômica de aplicação das várias alternativas para o local específico.

Além da precipitação de carbonato no solo, que ocorre através da reação da enzima urease, em solução, com cloreto de cálcio e ureia, outras substâncias já são frequentemente utilizadas para fins de modificação das propriedades físicas do solo como a diminuição de sua permeabilidade e incremento de capacidade de carga e estabilização, por exemplo. Dentre as substâncias utilizadas estão a goma guar e a bentonita sódica.

A goma guar é um dos estabilizantes e espessantes mais utilizados na indústria alimentícia e é retirada do endosperma do feijão do tipo guar, muito cultivado nos Estados Unidos, na Índia e no Paquistão. Sua principal propriedade é a capacidade de se hidratar rapidamente em água fria e atingir alta viscosidade, se dissolvendo e geleificando. (VALSECHI, 2001).

A goma guar apresenta características interessantes para melhorar as propriedades reológicas e de textura dos alimentos e da capacidade de retenção de umidade, sendo muito utilizada também em aplicações em que é necessário espessamento, estabilização, controle de viscosidade, suspensão e modificação de consistência, em diversos seguimentos da indústria (FUNAMI et al., 2005). Na indústria de petróleo, este biopolímero é no processo de fraturamento hidráulico, juntamente com os fluidos das estacas de perfuração, que vão gerar principalmente viscosidade e uma película fina, que recobrirá as paredes do furo a fim de estabilizá-la (FIGUEIRA; IZABEL; LOUREIRO, 2013).

Há ainda estudos sobre a utilização da goma guar na construção civil, utilizando-a misturada ao solo como barreira vertical à contaminantes (TRINDADE, 2010; EVANS, 1996), para o aumento da resistência ao cisalhamento e compressão do solo (GUPTA et al., 2009), controle de poeira, e contenção de processos erosivos (CHEN; LEE; ZHANG, 2014).

A bentonita sódica é uma argila plástica com predominância de sódio, do grupo mineral das esmectitas, originada frequentemente da alteração de cinzas vulcânicas depositadas sobre lagos ou rios de baixa turbulência. Esta substância se expande quando molhada, absorvendo algumas vezes sua massa seca em água, tendo também a capacidade de funcionar como selante e impermeabilizante (TONNESEN, 2010).

A bentonita sódica possui notáveis propriedades coloidais e reológicas, o que permite a sua utilização na perfuração de poços, para a exploração de petróleo ou gás natural, para sondagens de prospecção mineira ou geotécnica, para execução de fundações profundas (LUCKHAM; ROSSI, 1999), impermeabilização de solos para disposição de material tóxico (HARRIES-RESS, 1993) e formação de barreiras verticais de contenção com o objetivo de evitar a contaminação do lençol freático, solo, ou áreas específicas, impedir disseminação de contaminantes provenientes de vazamento de tanques de combustível, rompimento de canalizações que transportam matérias-primas como ácido e derivados do petróleo, despejo inadequado de produtos químicos, dentre outros (TRINDADE, 2010; PAGANI, 2007; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1998; EVANS, 1996;). As misturas utilizadas para aplicação desta técnica podem ser de solo-bentonita, solo-cimento-bentonita, bentonita-água, ou bentonita-água-cimento, dependendo da finalidade, tipo de solo, etc, promovendo a estabilização da trincheira escavada e aumentando sua impermeabilidade (PAGANI, 2007).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido juntamente ao Center for Bio-mediated and Bio-inspired Geotechnics (CBBG), centro pertencente à Arizona State University, universidade norte americana localizada no estado do Arizona, na cidade de Tempe, que é pioneira em avanços na área de engenharia geotécnica e promete soluções para grandes problemas ambientais e de infraestrutura, utilizando técnicas mais compatíveis com a proteção ambiental e métodos de restauração mais ecológicos (KULLMAN, 2015).

4.1 APARATO EXPERIMENTAL

Para realização deste experimento foram produzidas dezoito colunas de acrílico (Figura 1) no laboratório de solos do Centro de Biodesign da universidade norte americana Arizona State University em Tempe.

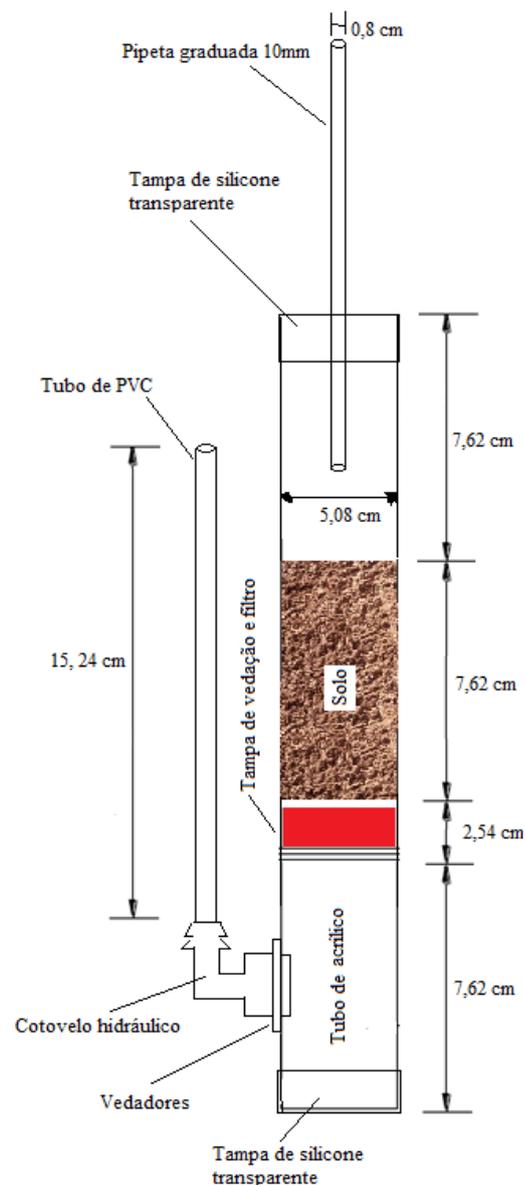


Figura 1 - Desenho esquemático da coluna utilizada para o experimento.
Fonte: Autoria própria.

Para sua produção, primeiramente foi feito um furo utilizando estilete a aproximadamente 3,5 cm da base da coluna de acrílico, no qual foi instalado um cotovelo hidráulico de rosca. Neste cotovelo foi instalado um pedaço de aproximadamente 15,24 cm de um tubo de PVC, com função de bombear água para dentro do tubo acrílico para o teste de permeabilidade. Após isto, a parte de baixo do tubo acrílico foi vedada utilizando uma tampa de silicone transparente e cola de silicone pra fixar a tampa.

Para cobrir e vedar a coluna utilizou-se outra tampa de silicone transparente e cola de silicone para fixação. Acoplado a esta tampa, uma pipeta graduada 10 mm com as pontas

cortadas, também com função introduzir água no tubo acrílico para o teste de permeabilidade, simulando um piezômetro.

A metodologia utilizada para a montagem destas colunas foi baseada no trabalho de Hamdan (2013) e em princípios hidráulicos da Lei de Darcy.

4.2 SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

O solo utilizado neste experimento foi solo típico do estado do Arizona, classificado como areia bem graduada com silte pelo Laboratório de Engenharia Geotécnica da Arizona State University.

A areia bem graduada com silte é uma areia com 5 a 12% de finos, permeável mesmo quando compactado, tendo uma excelente resistência ao corte quando compactado e saturado, com compressibilidade desprezível nas mesmas condições (ALMEIDA, 2005).

Os solos do Arizona, geralmente contêm uma quantidade relativamente baixa de matéria orgânica devido ao crescimento limitado da vegetação e a rápida decomposição dos restos vegetais. Isto ocorre principalmente nas regiões mais áridas, como é o caso da cidade de Tempe, de onde o solo foi proveniente, que devido às condições climáticas possui falta de umidade, o que limita reprodução vegetativa e inibe o acúmulo de matéria orgânica no solo (HENDRICKS, 1985).

Este solo foi escolhido por tratar-se da classe de solo predominante no local da pesquisa e também pela característica textural arenosa, sendo mais propício ao transporte de sedimentos e a percolação da água ocorrer de uma forma mais rápida, aumentando assim à suscetibilidade à processos erosivos.

4.3 SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS UTILIZADAS

Antes do solo ser colocado dentro das colunas de acrílico, foram primeiramente misturados à enzima, deixando a mistura assentar por uma semana dentro das colunas antes de realizar os ensaios de permeabilidade.

A enzima utilizada neste experimento foi a urease derivada da planta leguminosa *Canavalia ensiformis* (L.) DC, um tipo de feijão conhecida por *Jack Bean* ou feijão de porco, que é um feijão resistente à seca e cultivado em muitas áreas ao redor do centro-sul dos Estados Unidos (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2013). A enzima utilizada neste experimento especificamente foi comprada do fornecedor Sigma-Aldrich Corporation.

Com o objetivo de constatar se a adição das substâncias cimentantes poderia aumentar o potencial cimentante da enzima, foram utilizados a goma guar e a bentonita sódica, substâncias de alta viscosidade, largamente utilizadas em técnicas de contenção de remediação e contenção de solos (PAGANI, 2007).

Além destas substâncias, foram utilizadas a ureia e o cloreto de cálcio dihidratado como reagentes da reação de precipitação do carbonato de cálcio. Baseado em trabalhos anteriores realizados na Arizona State University, o experimento foi conduzido utilizando a concentração de 0,8 mol/L para a solução de cloreto de cálcio (1) e 1,6 mol/L para a de ureia (2) afim de criar uma solução de 800 ml.

$$\text{CaCl}_2 = 0,8 \text{ mol/L} \times 147,01 \text{ g/mol} \times 0,8 \text{ L} = 94,08 \text{ g de CaCl}_2 \quad (1)$$

$$\text{Ureia} = 1,6 \text{ mol/L} \times 60,06 \text{ g/mol} \times 0,8 \text{ L} = 77 \text{ g de ureia} \quad (2)$$

Depois de preparar esta solução, foi necessário ajustar seu pH para fornecer as condições apropriadas para induzir EICP. A faixa de pH desejada para a solução era entre 7,5 e 9,5, pois este é o intervalo de pH mais passíveis de precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3).

O pH foi então ajustado por adição de hidróxido de sódio (NaOH) à solução de cloreto de cálcio e ureia. As mudanças foram verificadas por pHmetro digital. O pH final das soluções após o ajuste foram 8 e 8,8.

Para a solução de enzima, também com base em trabalhos anteriores realizados na Arizona State University, a concentração desejada de enzima foi de 0,4 gramas por litro de solução (3). Assim, para gerar 800 ml de solução utilizou-se:

$$\text{Urease} = 0,4 \text{ g/L} \times 0,8 \text{ L} = 0,32 \text{ g de urease} \quad (3)$$

Após isto, em colunas específicas, adicionou-se ainda goma guar e a bentonita sódica. Nas colunas em que estas substâncias foram utilizadas, foi adicionado a mesma quantidade calculada para a enzima urease, ou seja, 0,32 g .

4.4 ORGANIZAÇÃO E PREPARAÇÃO DAS COLUNAS

As dezoito colunas foram preenchidas da seguinte maneira (Tabela 1): as colunas um, dois e três continham o carbonato de cálcio precipitado (EICP) e foram deixados à temperatura ambiente do laboratório (24 °C); as colunas quatro, cinco e seis por sua vez também continham a mesma substância, porém foram deixadas na estufa à temperatura de 45 °C.

Tabela 1 - Planejamento experimental das colunas de acordo com composição e temperatura.

Coluna	Composição	Temperatura (°C)
1	EICP	24
2	EICP	24
3	EICP	24
4	EICP	45
5	EICP	45
6	EICP	45
7	EICP e bentonita	24
8	EICP e bentonita	24
9	EICP e bentonita	45
10	EICP e bentonita	45
11	EICP e goma guar	24
12	EICP, bentonita e goma guar	24
13	Bentonita	24
14	Goma guar	24
15	Goma guar e bentonita	24
16	Controle	24
17	Controle	24
18	Controle	24

Fonte: Autoria própria.

As colunas sete, oito nove e dez tiveram o solo misturado, além da técnica de precipitação do carbonato de cálcio (EICP), com bentonita, sendo que as colunas sete e oito foram deixadas a temperatura de 24 °C a as colunas nove e dez à temperatura de 45 °C (Figura 2).



**Figura 2 - Colunas na estufa à temperatura de 45°C.
Fonte: Autoria própria.**

Na coluna onze o solo foi submetido à EICP e foi misturado à goma guar; a coluna doze, além de EICP, teve seu solo misturado com bentonita e goma guar. Na coluna treze o solo foi misturado apenas à bentonita; já a quatorze apenas à goma guar; e a quinze misturado a goma guar e bentonita juntas. As colunas dezesseis, dezessete e dezoito serviram como controle, ou seja, o solo não foi misturado a nenhuma substância. Todas estas foram deixadas à temperatura ambiente do laboratório (24 °C) (Figura 3).



**Figura 3 - Colunas à temperatura ambiente de 24 °C.
Fonte: Autoria própria.**

4.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Como exposto anteriormente, as colunas foram preenchidas com o solo e testadas em condições estáticas, visando reproduzir em menor escala uma situação real, e para a determinação do coeficiente de permeabilidade utilizou-se a Lei de Darcy.

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo "coeficiente de permeabilidade". A determinação deste é feita tendo em vista a lei experimental de Darcy. Este dimensionamento é válido para escoamento laminar, o que deve ser o considerado na maioria dos solos naturais (CAPUTO, 2012).

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) pode ser feita *in loco* pelos chamados ensaios de bombeamento. Quando o nível da água do experimento não é mantida a nível constante, que é este caso, são utilizados os cálculos para o ensaio com carga variável (DAS, 2011). A água do piezômetro flui através do solo. A diferença de carga inicial h_1 a um tempo $t=0$ é registrada e a água pode fluir através da amostra do solo de forma que a diferença de carga final no tempo $t=t_2$ seja h_2 (Figura 4).

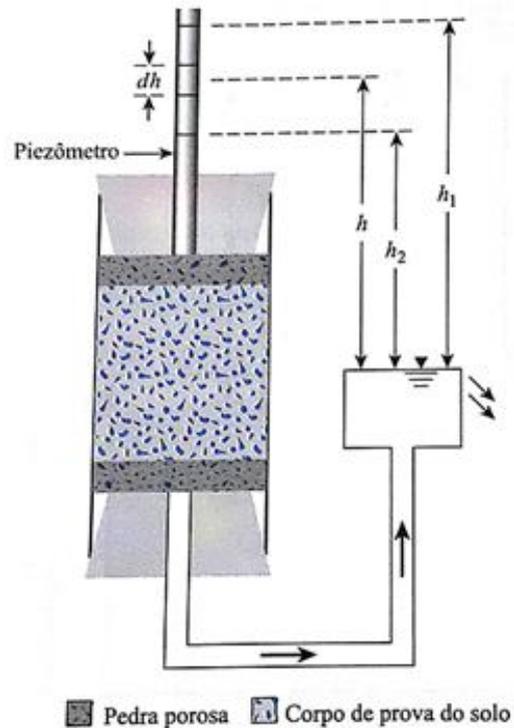


Figura 4 - Demonstração do ensaio de permeabilidade com carga variável.
Fonte: Das (2011).

Assim, o coeficiente de permeabilidade é expresso e pode ser calculado através da seguinte equação (DAS, 2011) (4):

$$k = 2,303 * \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

Onde:

a = área da seção transversal do piezômetro

L = comprimento da amostra de solo

A = área da seção transversal da amostra do solo

t = tempo necessário para mudança do nível da água

h_1 = carga inicial

h_2 = carga final

Após realizados os cálculos do coeficiente de permeabilidade semanalmente durante três meses em todas as dezoito colunas, foram feitas comparações baseadas nos valores típicos de permeabilidade (Tabela 2), verificando se a permeabilidade da areia diminuiu com a adição das soluções cimentantes, além de definir qual das soluções apresentou melhor eficiência neste quesito.

Tabela 2 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade.

Classificação	Permeabilidade	Tipo de solo	k (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhoso	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

Fonte: Ortigão (2007).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O monitoramento das colunas foi realizado ao longo dos meses de maio, junho e julho de 2015, durante treze semanas, quando o teste de permeabilidade foi realizado toda quinta-feira.

Os valores de permeabilidade foram obtidos através dos cálculos feitos a partir das medidas de área da seção transversal da coluna (a), comprimento da amostra de solo (L) e área da seção transversal da amostra do solo (A), medidos previamente ao início do experimento, bem como o valor da altura inicial da coluna d'água no piezômetro estabelecido (h_1) (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores utilizados para os cálculos dos coeficientes de permeabilidade.

COLUNA	a (cm ²)	A (cm ²)	L (cm)	h_1
1	0,5	20,27	5,25	10,5
2	0,5	20,27	5,65	10,5
3	0,5	20,27	5,25	9
4	0,5	20,27	5,55	10
5	0,5	20,27	5,75	9,5
6	0,5	20,27	5,65	8,5
7	0,5	20,27	5,75	10,5
8	0,5	20,27	5,75	10
9	0,5	20,27	5,75	10,3
10	0,5	20,27	5,75	9,9
11	0,5	20,27	8,75	14
12	0,5	20,27	7,75	9,8
13	0,5	20,27	5,55	10,6
14	0,5	20,27	5,35	9,6
15	0,5	20,27	5,65	8,9
16	0,5	20,27	5,55	8,4
17	0,5	20,27	5,25	11,5
18	0,5	20,27	5,55	11

Legenda: Área da seção transversal do piezômetro (a); área da seção transversal da amostra do solo (A); comprimento da amostra de solo (L); carga inicial (h_1).

Fonte: Autoria própria.

A partir da altura fixada da coluna d'água no piezômetro (h_1), mediu-se o tempo levado para que a água atingisse determinada altura final (h_2). Estes valores foram tabelados para o cálculo dos coeficientes de permeabilidade de cada cenário representado nas colunas.

Na colunas onze, contendo o solo submetido à precipitação do carbonato de cálcio induzido pela enzima urease (EICP) e a goma guar, na coluna doze, contendo solo com EICP, bentonita e goma guar, e na coluna quinze, contendo solo misturado à goma guar e bentonita, foi necessária a espera de 24h para fazer a verificação da diferença de alturas, em todas as datas das medições, pois era imperceptível a diferença de altura em um tempo menor. Isto se deve ao fato da alta impermeabilidade provocada por estas substâncias presentes no solo destas colunas.

Já nas colunas treze e quatorze, contendo solo misturado apenas à bentonita sódica e solo misturado à goma guar, respectivamente, a espera de 24h para a apuração das alturas finais ocorreu do dia 05 de maio a 24 de junho de 2015, ou seja, ao longo de oito medições. Isto também foi observado no primeiro dia de medição nas colunas sete e oito, contendo solo submetido à EICP e bentonita. Isto pode indicar que estas substâncias provocaram alta impermeabilidade no solo inicialmente e foram perdendo esta capacidade com o passar das semanas.

Pode-se destacar ainda as colunas nove e dez, contendo solo com EICP e bentonita, em que na primeira medição, obteve-se um tempo de 4,5 minutos para observar a diferença de alturas na coluna nove, porém notou-se a diminuição gradativa do tempo de percolação ao longo das semanas, sendo na última medição observado um tempo de 1,37 minutos. O mesmo ocorreu na coluna dez, onde o tempo mudou de 7 minutos na primeira medição para 1,30 minutos na última.

Em todas as outras colunas foi possível observar a diferença de altura em questão de segundos. Sendo nas colunas de controle, em que nada adicionou-se ao solo, verificados os menores tempos para percolação da água no solo, como já era esperado, por tratar-se de um solo arenoso.

É importante ressaltar que, a diferença de altura estabelecida, entre h_1 e h_2 , foi de 3 cm. Para as colunas que tiveram demora de 24h para observação da diferença não houve esta fixação.

A partir destes dados, aplicando o cálculo de coeficiente de permeabilidade, foram obtidos tais valores (Tabela 4), para as dezoito colunas nas treze medições. Nota-se que, na coluna quinze, foram obtidos valores negativos nas três primeiras medições. Isto ocorreu

devido à alta impermeabilidade do solo, que fez com que a água subisse através do piezômetro, ao invés de fluir através do solo.

Tabela 4 - Coeficiente de permeabilidade obtido durante três meses nas dezoito colunas.

Data	7/05	14/05	21/05	28/05	4/06	11/06	18/06	25/06	2/07	9/07	16/07	23/07	30/07
Coluna	VALORES DE PERMEABILIDADE (cm/s)												
1	8,97E-04	1,09E-03	1,12E-03	1,11E-03	1,25E-03	1,10E-03	1,13E-03	9,93E-04	1,16E-03	1,16E-03	1,13E-03	1,16E-03	1,18E-03
2	1,09E-03	9,94E-04	1,06E-03	1,20E-03	1,23E-03	1,16E-03	1,21E-03	1,32E-03	1,23E-03	1,30E-03	1,02E-03	1,26E-03	1,36E-03
3	9,80E-04	1,16E-03	1,63E-03	1,40E-03	1,34E-03	1,39E-03	1,37E-03	1,16E-03	1,23E-03	1,25E-03	1,05E-03	1,29E-03	1,31E-03
4	1,08E-03	8,82E-04	1,04E-03	8,95E-04	7,44E-04	8,76E-04	9,21E-04	8,63E-04	9,84E-04	9,63E-04	9,53E-04	1,04E-03	1,04E-03
5	8,46E-04	8,27E-04	9,55E-04	9,74E-04	1,03E-03	9,40E-04	9,40E-04	1,13E-03	1,03E-03	9,73E-04	8,80E-04	9,86E-04	9,70E-04
6	9,69E-04	9,18E-04	9,69E-04	8,35E-04	7,79E-04	7,49E-04	8,37E-04	8,46E-04	7,99E-04	8,38E-04	8,12E-04	7,12E-04	8,41E-04
7	9,19E-07	1,52E-05	1,45E-05	3,54E-06	1,03E-05	3,81E-06	5,40E-06	7,14E-06	5,33E-06	5,34E-06	1,44E-05	5,23E-06	3,69E-06
8	9,02E-07	1,54E-06	1,36E-06	1,47E-06	1,54E-06	1,63E-06	1,76E-06	2,00E-06	2,62E-06	4,48E-06	7,55E-06	9,04E-06	1,28E-05
9	1,34E-04	4,04E-04	3,74E-04	3,95E-04	4,03E-04	3,97E-04	3,90E-04	3,44E-04	4,09E-04	4,76E-04	4,67E-04	3,81E-04	3,50E-04
10	3,22E-05	1,51E-04	1,97E-04	3,04E-04	3,35E-04	3,20E-04	3,33E-04	3,17E-04	3,65E-04	3,35E-04	3,77E-04	4,00E-04	3,86E-04
11	9,09E-08	3,85E-07	2,83E-07	2,24E-07	2,83E-07	6,02E-07	5,57E-07	6,25E-07	6,02E-07	7,19E-07	6,72E-07	6,48E-07	5,57E-07
12	2,89E-07	1,88E-07	1,88E-07	6,88E-08	1,88E-07	2,27E-08	6,88E-08	1,40E-07	1,88E-07	9,22E-08	6,88E-08	1,16E-07	1,88E-07
13	2,64E-06	2,62E-05	4,41E-05	6,69E-05	6,88E-05	7,28E-05	7,79E-05	7,81E-05	7,70E-05	7,69E-05	5,32E-05	8,27E-05	6,94E-05
14	3,17E-07	1,50E-07	1,78E-06	1,16E-06	1,26E-06	1,34E-06	1,26E-06	1,38E-06	1,84E-06	2,76E-06	5,51E-06	9,96E-06	1,56E-05
15	-4,82E-07	-5,86E-07	-6,72E-07	1,72E-07	2,76E-07	2,34E-07	2,98E-07	3,64E-07	4,58E-07	6,36E-07	5,83E-07	7,76E-07	9,30E-07
16	3,23E-03	3,01E-03	3,46E-03	3,23E-03	3,24E-03	3,35E-03	3,39E-03	3,34E-03	3,40E-03	3,26E-03	3,34E-03	3,29E-03	3,08E-03
17	4,16E-03	3,71E-03	2,95E-03	3,15E-03	3,52E-03	3,60E-03	3,47E-03	3,60E-03	4,02E-03	3,85E-03	3,77E-03	3,77E-03	3,68E-03
18	3,69E-03	3,79E-03	3,89E-03	3,25E-03	4,07E-03	3,33E-03	3,48E-03	3,62E-03	4,43E-03	3,59E-03	3,62E-03	3,79E-03	3,40E-03

Fonte: Autoria própria.

Conforme Tabela 4, verificou-se uma diminuição da permeabilidade no solo com a técnica da precipitação do carbonato de cálcio aplicada, quando comparado às colunas de controle, que continham apenas solo. Isso comprova que a técnica utilizando a enzima urease como agente para a precipitação do carbonato diminui a permeabilidade do solo (Figura 5).

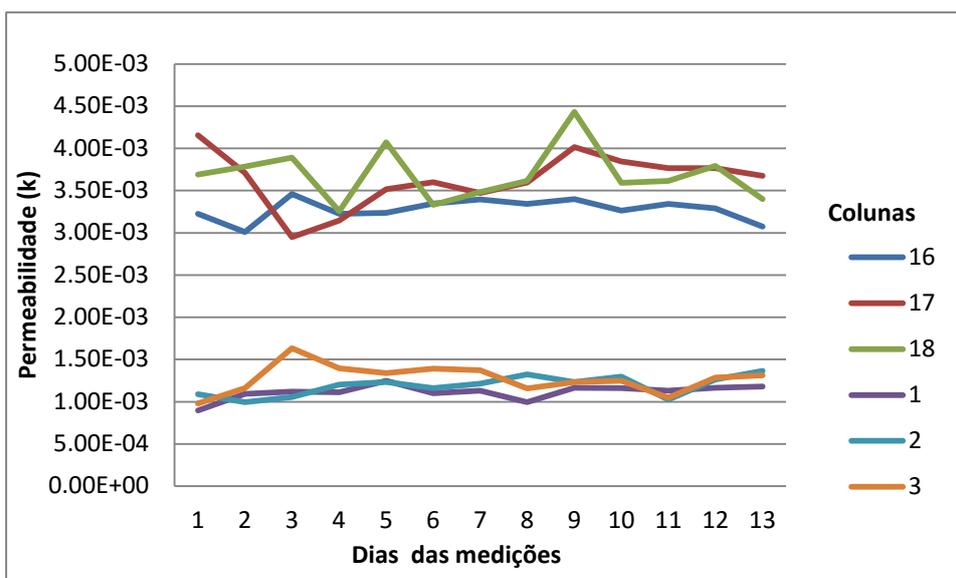


Figura 5- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas de controle (16, 17 e 18) e as contendo solo com carbonato de cálcio precipitado (1, 2 e 3).
Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que, a diminuição foi tênue, quando os valores de permeabilidade obtidos são comparados aos valores típicos deste coeficiente para areia (Tabela 2). Nota-se que não há mudança na característica da permeabilidade para solos pedregulhosos e arenosos, permanecendo na faixa de valores para solos permeáveis. Apesar disto, as amostras de solo contendo apenas o carbonato de cálcio precipitado, demonstraram eficiência no que diz respeito a regularidade dos resultados, não havendo o aumento dos valores de permeabilidade com o passar do tempo.

Outros autores apresentaram resultados semelhantes. Kavazanjian e Hamdan (2015) apresentam um estudo para o mesmo tipo de solo arenoso, contendo o carbonato de cálcio precipitado pela indução de enzima urease derivada do feijão de porco, com uma adição de 0,4 g/L de urease na solução. Testes de resistência à compressão axial no solo foram realizados, utilizando a metodologia de colunas de PVC, em que o solo foi deixado em cura por 30 dias, para posterior drenagem lenta da água. Neste estudo, verificou-se que o solo contendo o carbonato precipitado apresentou resistência de 529 kPa, apresentando zonas fortemente cimentadas após ser retirado da coluna de PVC. Enquanto que, no solo da coluna de controle, houve a desunião das partículas, sendo desprovido de qualquer agente de ligação. Apesar dos resultados terem sido considerados satisfatórios, Rojas (2007) destaca que, quanto à resistência à compressão simples, para resistências inferiores a 2MPa o solo apresenta maior facilidade de lixiviação. Levando-se em consideração este parâmetro pode-se dizer que, para

este caso a técnica não seria satisfatória para o aumento da capacidade de carga no solo, por exemplo, visto que apresentou um resultado de apenas 0,529 MPa de resistência.

Knorr (2014), utilizou uma técnica com solução de carbonato de cálcio precipitado, com o mesmo tipo de enzima urease em solução, contendo 0,4 g/L, com intuito de utilizar a substância como spray na parte superficial de solo arenoso. A substância foi borrifada em um recipiente contendo solo seco à uma inclinação de 15°. O teste foi realizado de maneira que, após a aplicação do spray contendo a substância, o solo recebeu água através de um bico de pulverização ligado à uma mangueira, durante três minutos. Visivelmente, o solo que recebeu o spray teve menos desprendimento de partículas no solo, quando comparado ao solo controle; o que comprovou-se após a pesagem da massa de solo erodida de cada um dos recipientes. O solo erodido do recipiente de controle, apresentou sete vezes mais massa do que o que recebeu o tratamento com EICP, fornecendo evidências para afirmar uma resistência relativamente elevada à erosão hídrica.

Quando comparadas as colunas contendo carbonato precipitado, porém com a mudança no cenário de temperatura (Figura 6), pôde-se observar que as colunas quatro, cinco e seis, que receberam a influência da temperatura mais elevada (45 °C), resultaram em valores mais baixos de permeabilidade, na ordem de 10^{-4} cm/s. Isto indica que esta técnica pode ser mais adequada à lugares com climas mais quentes.

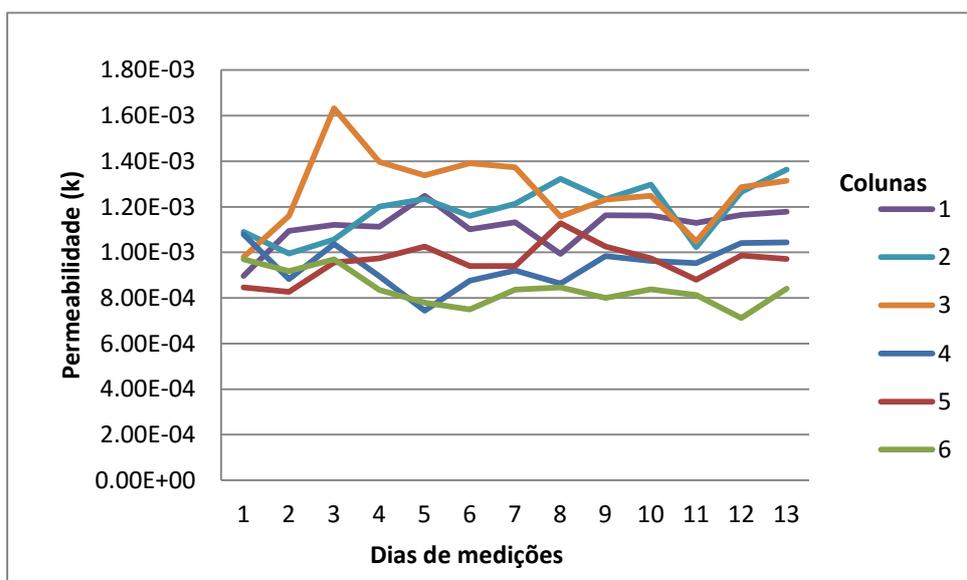


Figura 6- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetidos à técnica EICP com diferença de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

Apesar disto, Schmittner e Girese (1999), que avaliaram o tempo da precipitação de calcita em solo arenoso, alegam que a temperatura não é tão importante para a precipitação, quanto o pH. Sondi e Matijevic (2001), realizaram um trabalho com enzima urease e observaram que a precipitação do carbonato de cálcio foi mais eficiente em temperatura ambiente quando o pH estava entre 7 e 9. Stocks-Ficher et al. (1999), realizaram experimentos para precipitar carbonato de cálcio em solo arenoso e constataram que resultados satisfatórios foram obtidos em um intervalo de pH entre 8 e 9.

O pH das amostras não pôde ser mensurado durante os ensaios de bombeamento pela própria estrutura do experimento, consistindo em um recipiente totalmente selado. Porém, o pH das amostras foi, anteriormente ao início dos procedimentos, corrigido para valores entre 8 e 8,8 criando a condição ideal para a precipitação do carbonato de cálcio.

Nos ensaios de compressão do solo de Muñetón (2009), os planos de ruptura apresentados pelos corpos de prova contendo solo misturado ao extrato de feijão de porco foram muito similares às apresentadas pelo solo nas colunas de controle. Por conta desses resultados, o autor decidiu complementar a precipitação do carbonato de cálcio utilizando outro agente cimentante, um meio nutriente, nomeado B4.

Com intuito de verificar o comportamento do solo diante da utilização da técnica de precipitação do carbonato no solo misturado à substâncias conhecidas e já utilizadas para melhoramento do solo, utilizou-se a bentonita sódica e a goma guar.

Pôde-se verificar que as colunas nove e dez, com solo contendo o carbonato precipitado juntamente à bentonita sódica, submetidos à temperatura de 45 °C, demonstrou mais eficiência na diminuição da permeabilidade ao longo do tempo quando comparado ao solo que permaneceu à temperatura ambiente (Figura 7).

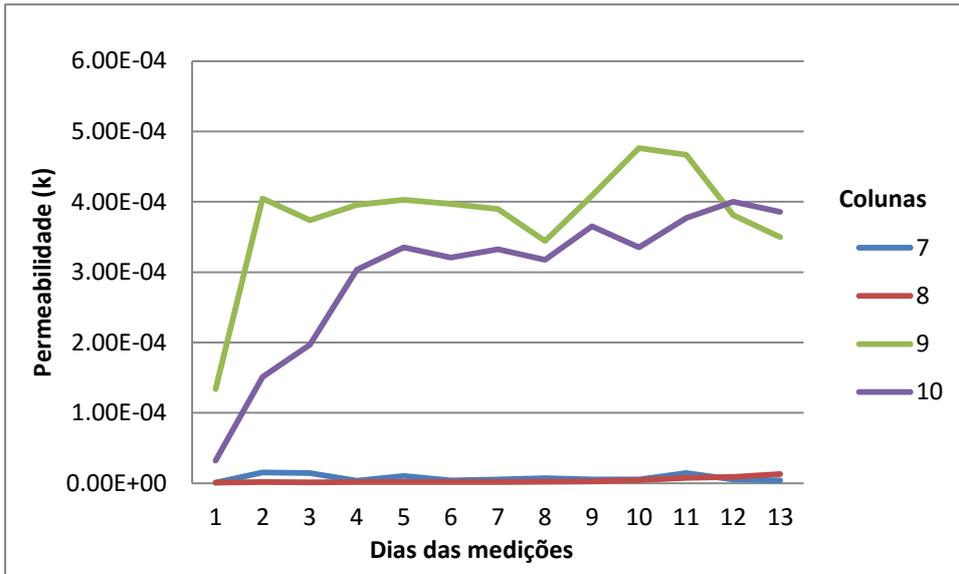


Figura 7- Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo misturado ao carbonato de cálcio e bentonita sódica com diferença de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

Como visto anteriormente, o solo contendo apenas o carbonato precipitado apresentou mais êxito em temperatura mais elevada, porém, percebe-se que a adição da bentonita sódica, diminuiu a permeabilidade do solo nos dois cenários de temperatura.

Os solos contendo as duas substâncias, carbonato e bentonita, apresentaram mudanças significativas quando comparados aos solos contendo apenas o carbonato precipitado (Figura 8), porém, para os valores típicos de permeabilidade, apenas as colunas deixadas a 24 °C apresentaram grandezas na ordem de 10^{-6} cm/s e 10^{-7} cm/s (Figura 8a) mudando a característica de permeabilidade do solo de alta para baixa, atributo de silte e argila, enquanto que as que permaneceram na estufa a 45 °C permaneceram na ordem de 10^{-4} cm/s, caracterizando alta permeabilidade (Figura 8b).

Não pode-se dizer, entretanto, que a temperatura tenha diminuído o potencial cimentante da técnica, visto que os solos são afetados pela variação de temperatura, em que a permeabilidade cresce com o aumento de temperatura (DUARTE, 2004; RABE, 1998).

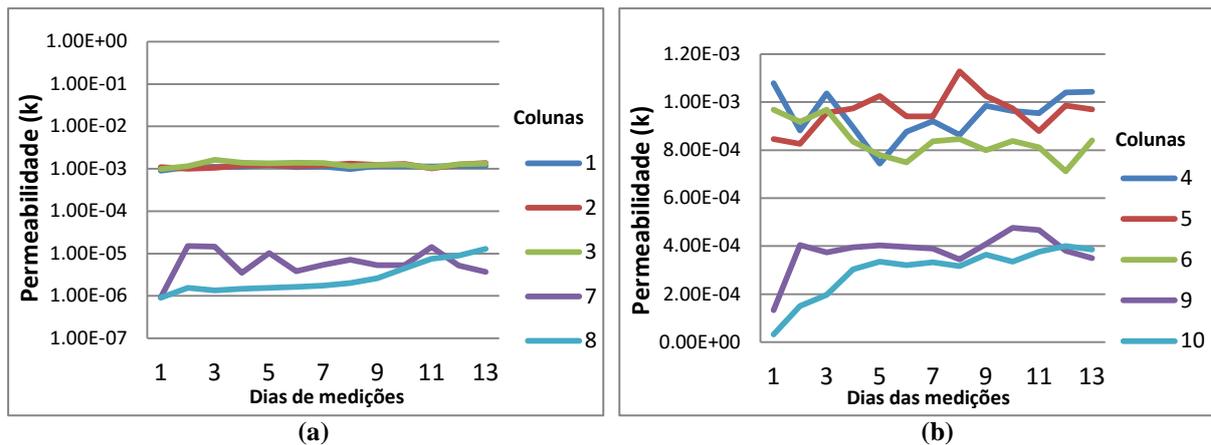


Figura 8 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo com carbonato precipitado apenas e o solo contendo carbonato de cálcio precipitado e bentonita sódica. a) 24 °C de temperatura, b) 45 °C de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

Nos testes de Kavazanjian e Hamdan (2015), a coluna com solo que recebeu mistura de bentonita e carbonato precipitado, manteve-se altamente cimentada em formato cilíndrico, após ser retirado da coluna de PVC, enquanto as colunas que não continham a bentonita apresentaram apenas algumas zonas cimentadas. Pagani (2007) realizou testes de compressão não confinado do solo, com misturas de solo-cimento-bentonita, apresentando uma queda na resistência do solo após atingir a resistência máxima, demonstrando ruptura frágil. A média de resistência alcançada foi de 119,7 kPa, valor menor do que o apresentado pelo corpo de prova em Kavazanjian e Hamdan (2015).

Na adição de goma guar ao solo percebeu-se que a permeabilidade diminuiu consideravelmente, permanecendo na ordem de 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s, representando uma permeabilidade muito baixa, com característica de solos argilosos. Isto ocorreu tanto para a coluna onze, com solo submetido à precipitação do carbonato e misturado à goma guar, como para a coluna doze, na qual adicionou-se, junto às duas substâncias anteriores, bentonita sódica. De todas às substâncias adicionadas ao solo, juntamente com a precipitação do carbonato de cálcio, neste experimento, a que teve mais êxito na diminuição da permeabilidade foi a goma guar (Figura 9).

Gupta et al. (2009), verificaram a estabilização de solo arenoso de deserto utilizando a goma guar. Constataram que como o solo contém íons, tais como Na^+ , K^+ e Ca^{2+} , a goma guar forma uma película viscosa quando em contato com estes íons, diminuindo a permeabilidade e aumentando a resistência ao cisalhamento e compressão do solo.

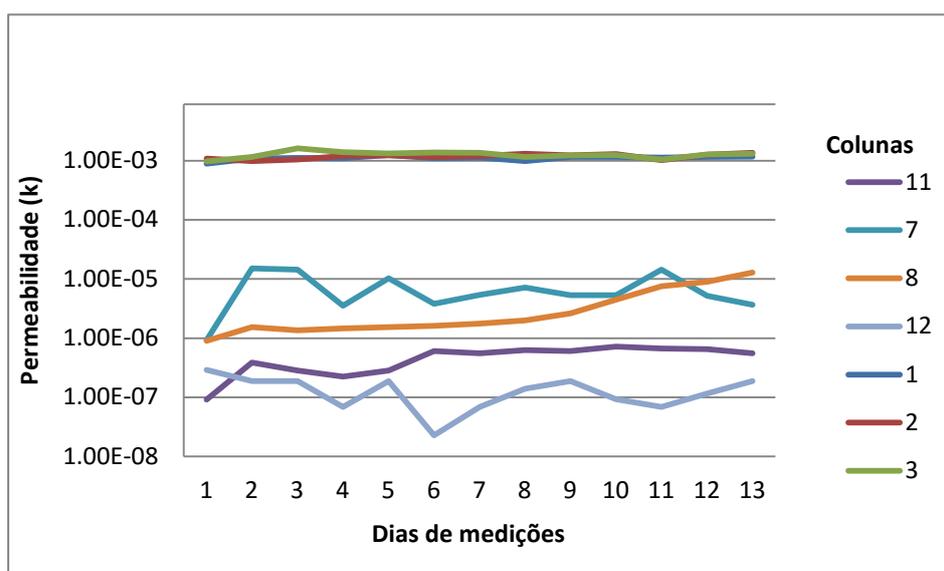


Figura 9 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetido à técnica de precipitação do carbonato de cálcio (1, 2 e 3), carbonato de cálcio e bentonita sódica (7, 8), carbonato de cálcio e goma guar (11), carbonato de cálcio, bentonita sódica e goma guar (12). Fonte: Autoria própria.

Com intuito de comprovar a eficiência da precipitação do carbonato de cálcio no solo induzido pela enzima urease como solução cimentante, o experimento também foi realizado com apenas a goma guar e a bentonita sódica misturadas ao solo, já conhecidas por sua capacidade de cimentação, a efeito de comparar como a adição da enzima ao solo poderia melhorar ainda mais a cimentação destas soluções mais populares. Notou-se que o solo contendo o carbonato de cálcio precipitado e a goma foi muito mais eficiente do que o solo contendo apenas a goma guar na medida em que este foi perdendo sua eficiência com o passar do tempo, visto que foi verificado um aumento da permeabilidade, com um coeficiente que caracteriza solos de permeabilidade baixa. Enquanto que o solo que também continha o carbonato precipitado manteve seu coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-7} cm/s e 10^{-8} cm/s, designando solos com permeabilidade muito baixa, de característica argilosa (Figura 10a).

Já quando compara-se o solo contendo apenas bentonita, com os solos contendo o carbonato precipitado e bentonita, percebe-se visivelmente que o solo misturado à bentonita vai perdendo a eficiência na diminuição da permeabilidade do solo com o passar das semanas, enquanto que os que também contêm o carbonato precipitado mantêm certa constância nos resultados como também menores valores de permeabilidade, com característica de solos com permeabilidade baixa (Figura 10b).

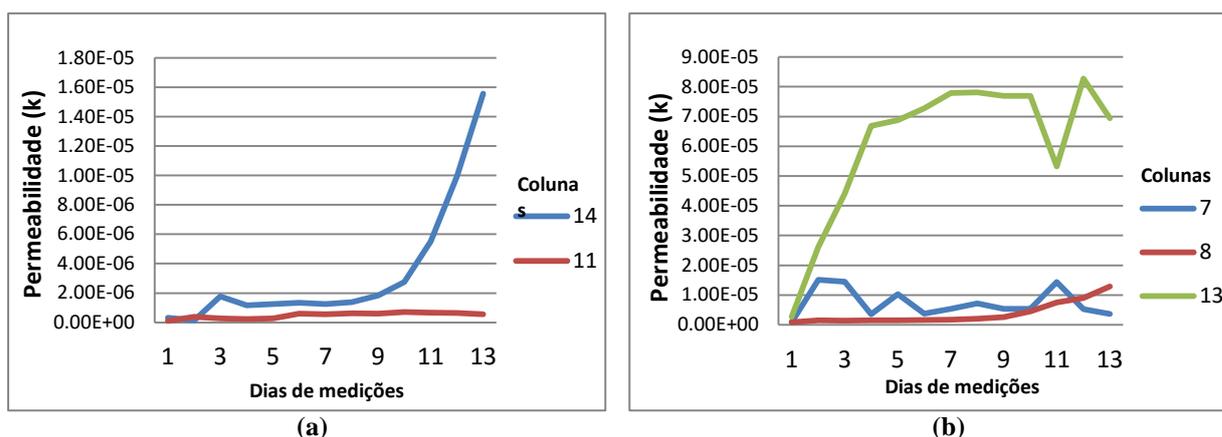


Figura 10 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade. a) Colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado e goma guar (11) e apenas goma guar (14), b) Colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado e bentonita sódica (7 e 8) e apenas à bentonita (13).

Fonte: Autoria própria.

As barreiras solo-bentonita, em locais onde ocorrem resíduos perigosos, funcionam como paredes semi-permeáveis com o objetivo de conter o lençol freático contaminado ou redirecionar o mesmo no caso de áreas com solos contaminados (PAGANI, 2007).

Valores usualmente utilizados em projetos de barreiras verticais de contenção do tipo solo-bentonita, devem possuir permeabilidade na ordem de 10^{-9} cm/s (LEMONS, 2006). A partir dos dados obtidos neste trabalho, o solo misturado apenas à bentonita, não poderia ser utilizado como material de preenchimento em barreiras verticais de contenção, para as condições e quantidade de material adicionado testados. Porém, as três técnicas combinadas, bentonita sódica, goma guar e carbonato de cálcio precipitado, apresentaram valores próximos ao desejado para barreiras de contenção.

A experiência de misturar bentonita sódica e goma guar ao solo, ocorrida na coluna de número quinze, foi considerada como ineficiente, pois, apesar de manter o coeficiente de permeabilidade muito baixo, na ordem de 10^{-7} cm/s, nas três primeiras medições ocorreu comportamento inesperado, onde a água foi ejetada do piezômetro, ou seja, a técnica manteve o solo altamente impermeável, não permitindo a penetração da água. Porém, percebe-se que ao solo em que foi adicionado as três substâncias, carbonato precipitado, bentonita e goma guar, o resultado foi diferente. O solo manteve-se com uma permeabilidade muito baixa de acordo com o coeficiente de permeabilidade, porém não ocorreu a alta impermeabilização do solo, o que aponta o um benefício da técnica de precipitação do carbonato de cálcio no solo (Figura 11).

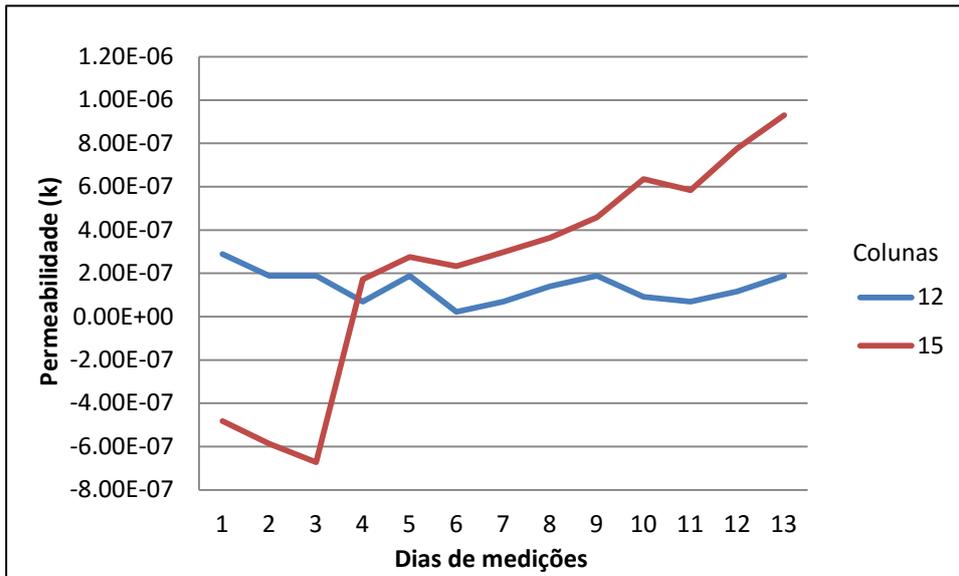


Figura 11 - Perfil temporal comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo misturado à carbonato de cálcio precipitado, bentonita sódica e goma guar (12) e solo misturado à apenas bentonita sódica e goma guar (15).

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que foi notável o aumento no volume dos solos que continham a substância bentonita, visto que esta substância se expande quando molhada, absorvendo algumas vezes sua massa seca em água. Isto aponta a necessidade de planejamento na utilização das técnicas, visto que o comportamento das substâncias devem estar previstos para que não ocorram incidentes.

6 CONCLUSÕES

Com base nos dados obtidos, os resultados corroboram o que descreve a literatura, confirmando a redução da permeabilidade no solo na utilização das substâncias cimentantes amostradas.

Com este trabalho, pôde-se constatar que a técnica de precipitar o carbonato de cálcio no solo através da ação da enzima urease de fonte agrícola diminui a permeabilidade do solo, ainda que de maneira tênue, apresentando melhores resultados para temperatura mais elevada, quando utilizada separadamente, ou misturada à goma guar.

No geral, nenhuma técnica apresentou maior eficiência na redução da permeabilidade separadamente, quando comparadas à utilização de duas ou mais técnicas combinadas. Neste sentido, pode-se considerar que de todas às substâncias adicionadas ao solo, juntamente com a precipitação do carbonato de cálcio, a goma guar foi a mais apropriada, em temperatura ambiente (24 °C), e a que também apresentou os melhores resultados quando utilizada separadamente.

Nota-se que as substâncias, já conhecidamente empregadas para fins de cimentação, goma guar e bentonita sódica, quando utilizadas separadamente no solo, perderam a eficiência com o passar dos meses, ao passo que, quando estas substâncias foram agrupadas ao carbonato de cálcio, além de baixa permeabilidade, houve a estabilidade dos resultados, com valores em torno de 10^{-7} cm/s, caracterizando solos de permeabilidade baixa a muito baixa. Isto indica que está técnica melhora a utilização destas substâncias, e prolonga os resultados desejados de cimentação.

Além disto, na utilização da goma guar juntamente com a bentonita sódica, percebeu-se uma condição altamente impermeável, ao passo que, quando estas duas técnicas foram utilizadas juntamente com o carbonato de cálcio precipitado, a permeabilidade do solo se apresentou muito baixa, porém não foi registrado a ocorrência de impermeabilidade do solo.

Isto indica que a utilização destas técnicas requer planejamento, visto que, cada substância utilizada deve ser avaliada de acordo com a finalidade, o grau de impermeabilidade desejado, clima local, tipo de solo, local de aplicação da técnica, quantidade de substâncias necessárias, e outros fatores que venham a influenciar.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Gil C. P. de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Agro Uesc: Juiz de Fora, 145 p., 2005.

ALVES, Ana C. et al. Métodos para quantificar a volatilização de amônia em solo fertilizado com uréia. In: **Reunião da sociedade brasileira de zootecnia**. 43 p., João Pessoa. Anais João Pessoa: SBZ, 2006.

ATKINS, P.W.; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 924 p., 2006.

BELLIDO, Natali. **Tratamento de efluentes contendo amônia**. 2003. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

BONATTO, Jaqueline; HEINECK, Karla S.; THOMÉ, Antonio. Técnica de Biocimentação para Tratamento de Solos Contaminados. In: Anais do **XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Goiânia-GO, 2014.

CAPUTO, Homero P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 243p., 2012.

CHEN, Rui; LEE, Ilsu; ZHANG, Lianyang. Biopolymer stabilization of mine tailings for dust control. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Carolina do Norte, v. 141, n. 2, p. 1802-1807, 2014.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 610p., 2011.

DEJONG, Jason T.; MORTENSEN, Brina; SOGA, Kenichi; BANWART, Steven A.; WHALLEY, W.Richard; MARTINEZ, Brian; KAVAZANJIAN, Edward. Harnessing Bio-Geotechnical Systems for Sustainable Ground Modification. **Geo-Strata**, Phoenix, v. 15, n. 4, p. 36-51, 2011.

DEJONG, J.T.; SOGA, K.S.; KAVAZANJIAN, E.; BURNS, S.; VAN PAASSEN, L.; AL QABANY, A.; AYDILEK, A.; BANG, S.S.; BURBANK, M.; CASLAKE, L.; CHEN, C.Y.; CHENG, X.; CHU, J.; CIURLI, S.; FAURIEL, S.; FILET, A.E.; HAMDAN, N.; HATA, T.; INAGAKI, Y.; JEFFERIS, S.; KUO, M.; LALOUI, L.; LARRAHONDO, J.; MANNING, D.A.C.; MARTINEZ, B.; MONTOYA, B.M.; NELSON, D.C.; PALOMINO, A.;

RENFORTH, P.; SANTAMARINA, J.C.; SEAGREN, E.A.; TANYU, B.; TSESARSKY, M.; WEAVER, T. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities, and challenges. **Geotechnique**, Londres, v. 63, n. 4, p. 287-301, 2013.

DUARTE, Anna P. L. **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica**. 2004. 290 p. (Doutorado em Engenharia Civil) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Práticas de Conservação do Solo e Recuperação de Áreas Degradadas**. ISSN 0104-9046, Documento 90, Rio Branco - AC, 2003. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/498802/1/doc90.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

EVANS, J. C. **Soil and cement-based vertical barriers with focus on materials**. In: RUMER, R. R.; MITCHELL, J. K. (Eds.). *Assessment of Barrier Containment Technologies*. Springfield: National Technical Information Service, 1996. p 05-43.

FERRIS, Grant F.; PHOENIX, Vernon; FUJITA, Yoshiko; SMITH, Robert W. Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10°C to 20°C in artificial groundwater. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Amsterdã, v. 67, n. 8, p. 1701–1722, 2003.

FIGUEIRA, Jeniffer; IZABEL, Janaína; LOUREIRO, Tatiana. Polímeros aplicados à indústria do petróleo. In: Anais da **7ª Semana de Polímeros do Instituto de Macromoléculas e Excelência em Polímeros**, Rio de Janeiro-RJ, 2013.

FUNAMI, T.; KATAOKA, Y.; OMOTO, T.; GOTO, Y. ASAI, I.; NISHINARI, K. Food hydrocolloids control the gelatinization and retrogradation behavior of starch. 2a. Functions of guar gums with different molecular weights on the gelatinization behavior of corn starch. **Food Hydrocolloids**, Oxford, v. 19, n. 1, p. 15 – 24, 2005.

GÓMEZ, Edilma. **Evaluación de las propiedades geotécnicas de suelos arenosos tratados con bacterias calcificantes**. 2006. 147 p. Tese (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colômbia, 2006.

GUPTA, Satish C.; HOODA, K. S.; MATHUR, N. K.; GUPTA, S. Tailoring of guar gum for desert sand stabilization. **Indian Journal of Chemical Technology**, Jodhpur, v. 16, p. 507 - 512, 2009.

HAMDAN, Nasser. **Carbonate Mineral Precipitation for Soil Improvement through Microbial Denitrification**. 2013. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Arizona State University, Tempe, EUA, 2013.

HAMMES, F.; SEKA, A.; DE KNIJF, S.; VERSTRAETE, W. A novel approach to calcium removal from calcium-rich industrial wastewater. **Water Research**, Oxford, v. 37, p. 699–704, 2003.

HARRIES-RESS, K. Minerals in waste and effluent treatment. **Industrial Minerals**, Londres, v. 308, n. 2, p. 29-39, 1993.

HENDRICKS, David M. **Arizona Soils**. 1. ed. Tucson, AZ: College of Agriculture, 167p., 1985.

KAVAZANJIAN, Edward.; HAMDAN, Nasser. Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) Columns for Ground Improvement. In: INTERNATIONAL FOUNDATIONS CONGRESS AND EQUIPMENT EXPO 2015, 2015, San Antonio, TX, USA, **Anais eletrônicos...** San Antonio: IFCEE 2015. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784479087>>. Acesso em: 10 out. 2015.

KAVAZANJIAN, Edward; HAMDAN, Nasser. Mineral precipitation methods. **Geotechnical Special Publication**, Arizona, v. 256, n. 9, p. 2252-2261, 2013.

KNORR, Brian. **Enzyme-Induced Carbonate Precipitation for the Mitigation of Fugitive Dust**. 2014. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Arizona State University, Tempe, EUA, 2014.

KULLMAN, Joe. **ASU taking reins of new national geotechnical engineering research center**, 2015. Disponível em:< <http://fullcircle.asu.edu/research/asu-taking-reins-of-new-national-geotechnical-engineering-research-center/>>. Acesso em: 10 de ago. 2015.

LEMOS, Rosemar G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. 2006. 310 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

LUCKHAM, Paul. F.; ROSSI, Sylvia. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. **Advances in Colloid and Interface Science**. v. 82, p. 43 - 92, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868699000056>>. Acesso em: 09 mar. 2016.

MEYER, F.; BAN, S.; MIN, S.; STETLER, L.; BANG, S. Microbiologically-Induced Soil Stabilization: Application of Sporosarcina Pasteurii for Fugitive Dust Control. In: GEO-FRONTIERS - ADVANCES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2011, Dallas, TX, USA, **Anais eletrônicos...** Texas: Geo-Frontiers 2011. Disponível em: <http://www.tcd.ie/civileng/Staff/Brendan.OKelly/Research%20publications%20for%20Modules/2015_Improving%20sand%20with%20microbial-induced%20carbonate%20precipitation_ICE%20Ground%20Improvement.pdf>. Acesso em: 12 out. 2015.

MONTOYA, B.M.; DEJONG, J.T.; BOULANGER, R.W.; WILSON, D.W.; GERHARD, R.; GANCHENKO, A.; CHOU, J-C. Liquefaction Mitigation using Microbial Induced Calcite Precipitation. In: ASCE **Geo-Institute Annual Conference**, 2012, Oakland, CA, USA, **Anais eletrônicos...** Oakland: ASCE Geo-Congress, 2012. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412121.197>> Acesso em: 12 out. 2015.

MONTOYA B.M., FENG K., SHANAHAN C. Bio-mediated soil improvement utilized to strengthen coastal deposits. In: 18th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2013, Paris, França, **Anais eletrônicos...** Paris: ICSMGE, 2013. Disponível em: <http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Paper/Paper_Other/18ICSMGE/TC211.pdf> Acesso em: 5 ago. 2015.

MUÑETÓN, Claudia M. G. **Uso da biotecnologia na melhoria de solos para fins de pavimentação rodoviária**. 2009. 122 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

NEMATI, Mehdi; VOORDOUW, Gerrit. Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymatic option. **Process Biochemistry**, Londres, v. 40, p. 925–933, 2005.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 385p., 2007.

PAGANI, Bianca R. **Estudo de misturas solo-cimento-bentonita-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. 2007. 117 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PAZZETTO, Morgane B. **Estudo da permeabilidade de solos argilosos disponíveis para recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão no sul de Santa Catarina**. 2009. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.

RABE, Claudio. **Efeito da Temperatura em Solos**. 1998. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1998.

RAMACHANDRAN, Santhosh K.; RAMAKRISHNAN, Venkatraman; BANG, Sookie S. Remediation of concrete using micro-organisms. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 98, n. 1, p. 3-9, 2001.

RIBEIRO, Ana Luísa S. **Técnica de tratamento de solos – Jet Grouting Acompanhamento de um caso real de estudo – Cais de Santa Apolónia e Jardim do Tabaco**. 2010. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.

RODRIGUEZ NAVARRO, Carlos; RODRIGUEZ GALLEGO, Maria.; CHEKROUN, K. Ben; GONZALEZ MUNOZ, Maria Teresa. Conservation of ornamental stone by *Myxococcus xanthus* induced carbonate biomineralization. **Applied Environmental Microbiology**, Washington DC, v. 69, p. 2182– 2193, 2003.

ROJAS, José Waldomiro J. **Estudo de remediação de solo contaminado por borra oleosa ácida utilizando a técnica de encapsulamento**. 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SCHMITTNER Karl E.; GIRESSE Pierre. Micro-environmental controls on biomineralization: superficial processes of apatite and calcite precipitation in quaternary soils. **Sedimentology**, v. 46, n. 3, p. 463 - 476, 1999. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-3091.1999.00224.x/abstract>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

SONDI, Ivan; MATIJEVIĆ, Egon. Homogeneous Precipitation of Calcium Carbonates by Enzyme Catalyzed Reaction. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 238, n. 1, p. 208 – 214, 2001.

STOCKS-FIRSCHER, Shannon; GALINAT, Johnna K.; BANG, Sookie S. Microbiological precipitation of CaCO₃. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 11, p. 1563 - 1571, 1999. Disponível em: <<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-5f57d226-ac3b-39c9-9922-c581a4e0879d>>. Acesso em: 5 abr. 2016.

TONNESEN, Diego A. **Caracterização e beneficiamento das bentonitas dos novos depósitos de Cubati-PB**. 33 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

TRINDADE, Eónio M. A. **Uso de Polímero como substituto da bentonite na estabilização de escavações em solos.** 2010. 73 p. (Mestrado em Engenharia Geológica) - Universidade de Évora, Évora, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Plants Profile: The Jack Bean,** 2013. Disponível em: <<http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=caen4>>. Acesso em: 15 out. 2015.

VALSECHI, Octávio A. **Aditivos.** Universidade Federal de São Carlos - Centro de Ciências Agrárias: Araras, 2001. Disponível em: <<http://www.cca.ufscar.br/~vico/Aditivos.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2015.

VAN PAASSEN, Leon. **Ground Improvement by microbially induced carbonate precipitation.** 2009. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) - Delft University of Technology, Delf, Holanda, 2009.

WHIFFIN, Victoria S.; VAN PASSEN, Leon A.; HARKES, Marien P. Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique. **Geomicrobiology Journal**, Abingdon, v. 24, p. 417–423, 2007.