

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE SOLO ARENOSO ATRAVÉS DO ENSAIO DE PLACA APÓS A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE BIOCIMENTAÇÃO – MICROBIALLY INDUCED CALCITE PRECIPITATION

RESISTANCE ANALYSIS OF SANDY SOIL BASED ON PLATE LOAD TEST AFTER THE APPLICATION OF THE BIOCEMENTATION TECNICH – MICROBIALLY INDUCED CALCITE PRECIPITATION

Vinicius Luiz Pacheco ^{1*}, Igor Decol ², Antonio Thomé³

^{1*}Universidade de Passo Fundo, Prog. De Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.
E-mail: vinimanfroipacheco@gmail.com

²Universidade de Passo Fundo, Prog. De Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.
E-mail: igor2311@gmail.com

³Universidade de Passo Fundo, Prog. De Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental.
E-mail: thome@upf.br

*Autor para correspondência: Campus I, Prédio R1, Universidade de Passo Fundo – BR 285, Bairro São José – Passo Fundo/RS, CEP: 99052-900

RESUMO

Devido ao avanço econômico e infraestrutural o aproveitamento de áreas e materiais sustentáveis é necessário, considerando os materiais que possuam propriedades físico-mecânicas necessárias a respectiva empregabilidade em obras de Engenharia. Correlacionando a área da Engenharia Geotécnica, a técnica de melhoramento do solo através da adição de cimento, torna-se inadequada em relação a emissão de CO₂ na atmosfera durante o processo de fabricação do cimento. Assim, outras técnicas de melhoramento de solo são objetivos de estudos, tais quais a MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), na qual realiza um estímulo bacteriano, principalmente das bactérias do tipo *Bacillus pasteurii* através da injeção de alimento aos microrganismos presentes no solo, formando assim carbonato de cálcio e por consequência provendo ao solo um aumento da capacidade de carga, através do fenômeno de formação de calcite. Tem-se por objetivo avaliar o comportamento mecânico do solo arenoso, formado pela areia de Osório em relação à aplicação da técnica MICP. Mensura-se então tal tratamento através de ensaios de capacidade de carga, no caso em questão utiliza-se o Ensaio de Placa, para obtenção da deformação e ganho de resistência do solo em estudo.

Palavras-chave: Areia de Osório, MICP, Ensaio de Placa.

ABSTRACT

Due to the economic and infrastructural development, the use of sustainable areas and materials is necessary by considering the materials that have applicable physic-mechanics properties in the line of Engineering Construction. Correlating the branch of Geotechnical Engineering, the technic of improvement of the soil by adding cement is inadequate because the emission of CO₂ into the atmosphere; during the process of fabrication of the cement. Thus, others technics of improvement of the soil are objectives of the studies, like MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), in which uses the bacterial stimulation, mainly by the bacteria of the type *Bacillus pasteurii* by injecting nutrients for the microrganisms within the soil and creating calcium carbonate and by consequence providing to the soil an increase in the strength of the soil because of the phenomenon of the formation of calcite. The goal of the study is to measure the mechanical comportment of the sandy soil, composed by the Osório Sand, after the application of the MICP's technic. So, the measure of the treatment is evaluated by load capacity tests, in this particular case the Plate Load Test is used in order to verify the deformation and the resistance's increase in the sand soil of the main study.

Keywords: Osório Sand, MICP, Plate Load Test.

1. INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento econômico dos países em meio a um ambiente de globalização requer diretamente o avanço da infraestrutura de forma sustentável dos países. A busca no melhoramento do solo de obras civis se mostra essencial para o acompanhamento do desenvolvimento econômico, juntamente com a presença de solos utilizáveis em obras de infraestrutura. (MONTROYA, 2012).

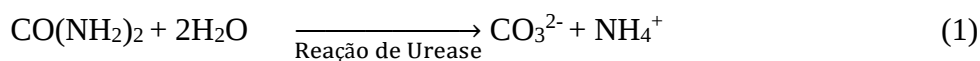
O aquecimento global e a produção de dióxido de carbono (CO₂) são assuntos que estão em pauta na atualidade. Sendo que na produção de cimento tem-se significativa emissão de (CO₂), busca-se a diminuição do uso do material, para tanto são necessários novos estudos com métodos emergentes nos quais possam garantir as propriedades físico-mecânicas necessárias aos materiais para sua aplicação na Engenharia, podendo ser em melhoramento de solos bem como na aplicação em concretos e argamassas, reparos de construções em concreto e biorremediação de solos contaminados com metais e outros poluentes (ACHAL *et al.*, 2012; CHOI *et al.*, 2017; KANG *et al.*, 2014; KRAJEWSKA, 2017; LI *et al.*, 2016).

O entendimento do solo, como material nos remete a um contexto histórico datado dos últimos 300 anos em relação as propriedades físicas e mais recente se mostram os estudos relacionados a participação dos microrganismos no desenvolvimento do planeta e inclusive aplicados em técnicas interativas com solos (MITCHELL e SANTAMARINA, 2005).

Dentre os mecanismos que as engenharias possuem para melhoramento de solos, podemos referenciar o controle de erosão, aumento da resistência dos solos, trabalhabilidade bem como o encapsulamento de materiais contaminantes. Para tanto, os solos de formação arenosa, atualmente são aptos a aplicação de diversas técnicas, nas quais dependem do custo, tratamento desejado e método a ser aplicado, possibilitando o uso do solo para fins desejados (DEJONG *et al.*, 2006; GOMEZ *et al.*, 2017; van PAASSEN *et al.*, 2010).

A biologia aplicada a engenharia geotécnica pode ser vista em variadas formas de aplicação, sendo elas: na cobertura vegetal de taludes, controle de permeabilidade de solos e erosão. Outro ramo, relativamente mais recente, é o ramo biogeotécnico, principalmente com a precipitação microbiana induzida de carbonato de cálcio (MICP-Microbially Induced Calcite Precipitation). Técnica esta que faz o uso de bactérias ureolíticas é eficiente na geotecnia para aplicações como melhoramento de propriedades mecânicas de solos arenosos, controle de fluxo de água, controle de permeabilidade e bioimobilização de metais contaminantes (ACHAL e PAN; 2014; MANI e KUMAR, 2014; QABANY *et al.*, 2012).

O processo bioquímico tem por base a hidrólise da ureia, na qual decompõe o componente, de acordo com a Equação (1), dando origem a reação de urease (ACHAL e PAN, 2014; NG *et al.*, 2012; PEDREIRA, 2012; QABANY *et al.*, 2012).



Sequencialmente, na Equação (2) ocorre a formação da calcite através da combinação dos íons de carboneto juntamente com os íons de cálcio, fornecidos pelo cloreto de cálcio (ANBU *et al.*, 2016; NG *et al.*, 2012; STOCK-FISCHER *et al.*, 1999).



O trabalho em questão, com base nos benefícios da prática da biocimentação analisou o ganho de resistência de solo com biotratamento, composto pela areia de Osório, em relação ao mesmo solo sem o processo de biocimentação. Considerando os microrganismos nativos da areia de Osório, sem a prática de bioaugmentação, apenas fornecendo substrato aos microrganismos nativos do solo, para que

os mesmos realizem a hidrólise da ureia através da atividade enzimática, gerando o produto final da biocimentação, a calcite. O estímulo de microrganismos naturais se justifica pela presença da bactéria *Bacillus pasteurii* no presente solo, a qual é bactéria produtora da enzima da urease.

2. MATERIAIS

2.1 – Areia de Osório

O solo utilizado no desenvolvimento do trabalho proposto foi a areia proveniente da cidade de Osório, situada no estado do Rio Grande do Sul, de acordo com a Figura 1. A justificativa da utilização desse material se deve pela eficácia da técnica de biocimentação em solos arenosos, especificamente a areia de Osório foi selecionada por obter parâmetros granulométricos e índices físicos compatíveis com estudos prévios realizados em biocimentação e ainda conter a bactéria *Bacillus pasteurii*. Logo, optou-se por tal material pela questão logística, prática e propriedades específicas.



Figura 1 – Localização da cidade de Osório/RS (CRUZ, 2008)

A análise granulométrica do material respeitou a norma NBR 7181/2016, conforme apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição Granulométrica da areia de Osório (CRUZ, 2008)

Abertura da peneira (mm)	% passante
0,60	100,00
0,425	99,97
0,30	99,47
0,15	38,50
0,075	1,55
0,0534	0

Com base nos dados apresentados, é traçada a curva granulométrica do material, conforme Figura 2. Tem-se também os índices físicos da areia, de acordo com a Tabela 2.

A forma de uso do material ocorreu através da secagem natural prévia do mesmo, com a finalidade de controle de umidade para a moldagem dos corpos de prova. Ainda, ressalta-se que não houve a esterilização da areia de Osório, visando a permanência dos microrganismos naturais do solo. Logo, em última análise, diz-se que o material não ficou em contato com outros materiais, apenas passou pelo processo de secagem natural.

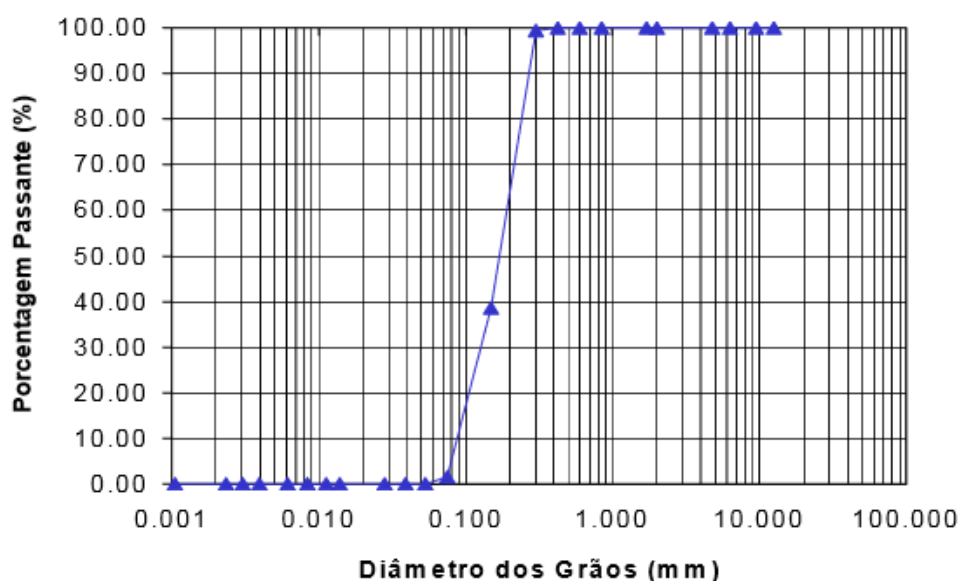


Figura 2 – Curva da distribuição granulométrica da areia de Osório (CRUZ, 2008)

Tabela 2 – Índices físicos da areia de Osório (CRUZ, 2008)

Índices Físicos	Areia de Osório
Massa específica real dos grãos	2,65 g/cm ³
Coeficiente de uniformidade, C_u	2,11
Coeficiente de curvatura, C_c	1,15
Diâmetro médio, D_{10}	0,09 mm
Diâmetro médio, D_{50}	0,17 mm
Índice de vazios mínimo, $e_{mín}$	0,60
Índice de vazios máximo, $e_{máx}$	0,85

2.2 – Solução Biocimentante

A precipitação de carbonato de cálcio depende da solução cimentante a ser utilizada na qual deverá fornecer ureia, para que ocorra a hidrólise e os microrganismos presentes no solo se alimentem da mesma e sejam capazes de produzir CO_3^{2-} e 2NH_4^+ . Juntamente com a inserção da ureia, deve-se fornecer cloreto de cálcio para a formação do carbonato de cálcio e a consequente cimentação do solo.

Para esse processo experimental, a solução cimentante utilizada foi adaptada de Garbin (2016) para a utilização no solo composto pela areia de Osório, bem como composições rearranjadas de Amarakoon e Kawasaki (2016) e Mortensen (2011). Segue na tabela 3 a solução cimentante proposta para o trabalho.

Tabela 3 – Composição da Solução Biocimentante (GARBIN, 2016)

Reagente	Concentração (g/L)
Peptona	2
Extrato de Levedura	1
Cloreto de Amônia	10
Bicarbonato de Sódio	2,12
Ureia	30
Cloreto de Cálcio	56

3. MÉTODOS

O processo metodológico do projeto de pesquisa teve por propósito a realização dos ensaios de placa para avaliação da resistência. Para tal finalidade, foram moldados três corpos de prova com a areia de Osório em camadas de 5 centímetros, totalizando uma altura total de 30 centímetros; o processo de moldagem é demonstrado na Figura 3. Sendo os corpos de prova: o primeiro (CP_01Branco) sem aplicação da técnica de biocimentação, com densidade relativa de 50% e umidade inicial da areia de 10%; o segundo (CP_02Branco) com 14 aplicações de água em um montante de 2 vezes o volume de vazios (70 litros) do corpo de prova por aplicação, densidade relativa de 50% e umidade inicial da areia de 10%; o terceiro (CP_03Biocimentado) com a aplicação da técnica de biocimentação durante 28 dias e as injeções intervaladas entre 48 horas com 2 vezes o volume de vazios (70 litros) do corpo de prova por injeção, com densidade relativa da areia de 50% e umidade inicial da areia de 10%. As injeções foram aplicadas por intermédio de um regador individual para cada finalidade, buscando dessa forma uma abrangência maior da superfície do corpo de prova e a mitigação de deformações no contato da solução biocimentante/água com a superfície dos corpos de prova; características de acordo com a Tabela 4.



Figura 3 – Processo de Moldagem dos corpos de prova
Tabela 4 – Distribuição das informações dos Corpos de Prova

	CP_01Branco	CP_02Branco	CP_03Biocimentado
Espessura por camada (cm)	5	5	5
Altura total (cm)	30	30	30
Aplicação H ₂ O (14 vezes)	-	70	-
Aplicação da Solução Biocimentante (litros) (14 vezes)	-	-	70
Densidade Relativa (%)	50	50	50

A avaliação dos resultados obtidos pelo presente ensaio foi feita com base nos critérios de Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) do solo e na capacidade de carga de fundações sobre solos cimentados.

Para a avaliação dos resultados obtidos através dos ensaios de placa, adotou-se o critério que define a Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$), sendo ele:

-Critério: Sendo o recalque máximo igual a $D/30$, onde D representa o diâmetro da placa, nesse caso igual a 7,5 centímetros. Nos experimentos é representado então pelo recalque de 2,5 milímetros e a consequente tensão correspondente a esse recalque.

A avaliação da capacidade de carga de fundação e consequente determinação da Tensão Admissível do solo (σ_{adm}) adota-se o critério de 2% do recalque relativo. Em concordância com estudos prévios realizados em solos cimentado, não-cimentados e capacidade de carga de fundações apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais (THOMÉ, 1999).

O corte esquemático com as dimensões dos corpos de prova e a aplicação do ensaio de placa segue na Figura 4. Já na Figura 5, mostra-se a aplicação do ensaio de placa no CP_03Biocimentado.



Figura 4 – Corte esquemático da aplicação do ensaio de placa

Os ensaios foram realizados nos CP_01Branco, CP_02Branco e no CP_03Biocimentado, nas respectivas datas: 29/09/2016, 27/10/2016 e 16/11/2016-17/11/2016.

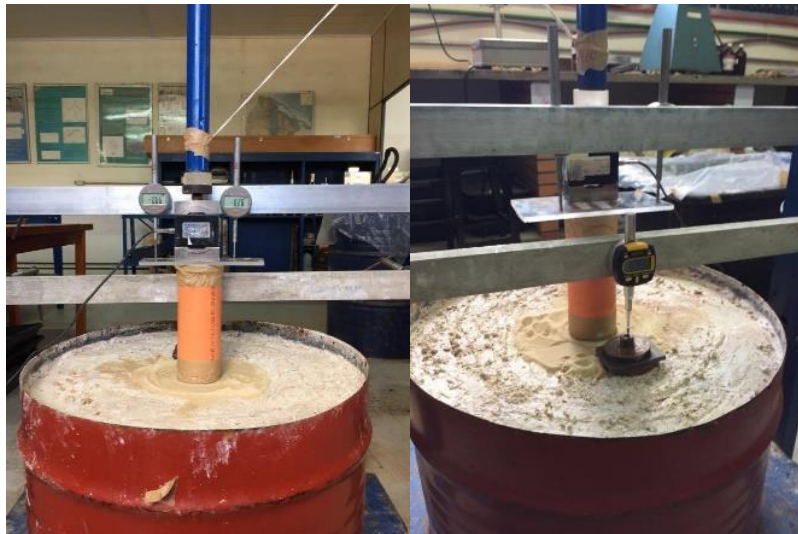


Figura 5 – Aplicação do ensaio de placa no CP_03Biocimentado

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos para Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) e para Tensão Admissível (σ_{adm}) foram realizados separadamente e suas respectivas análises encontram-se nos itens subsequentes.

4.1 – Resultados do CP_01Branco

Para o referido corpo de prova, foi realizado o ensaio de placa de acordo com a descrição citada nos itens anteriores. Na Figura 6 é possível observar a “Tensão vs Recalque” e o comportamento da areia de Osório sem a aplicação da solução biocimentante, apenas com a densidade relativa do material em 50%; e atingindo os 25 mm de recalque, segundo recomendações da NBR 6489 (ABNT, 1984).

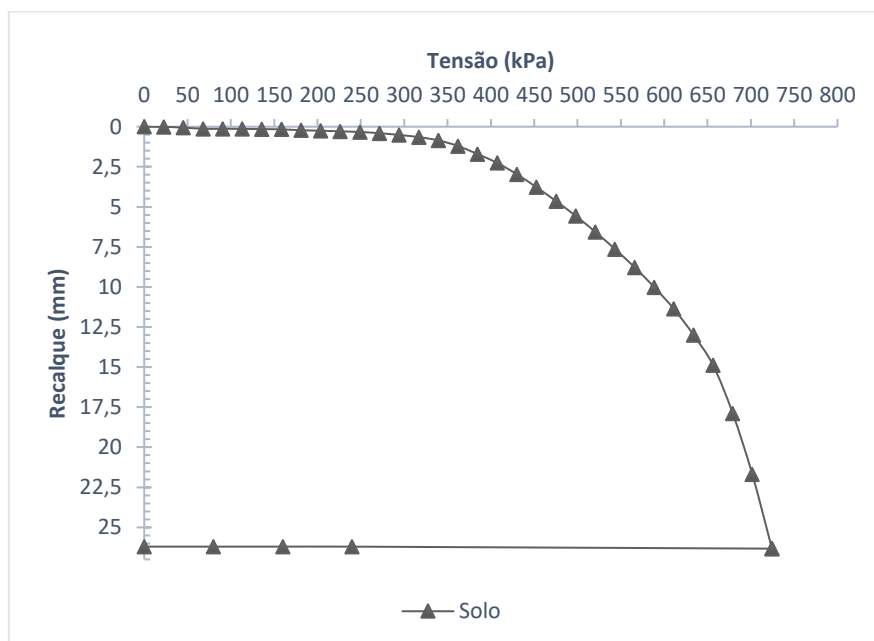


Figura 6 – Curva de Tensão vs Recalque do CP_01Branco

A Tensão de Ruptura do referido corpo de prova ($\sigma_{ruptura}$) foi definida através do critério proposto, e mesma tem a magnitude de $\sigma_{ruptura} = 410$ kPa, de acordo com a Figura 6, onde no recalque de 2,5 mm (D/30), a respectiva tensão é encontrada.

Em virtude da metodologia proposta para a determinação da capacidade de carga do presente solo, é possível matematicamente através do gráfico da Figura 7, a determinação da Tensão Admissível (σ_{adm}), sendo essa, $\sigma_{adm} = 375,26$ kPa, equivalente a uma carga de 165,78 kgf. Por motivos técnicos de segurança recomendados pela ABNT NBR 6122 (2010), adota-se então um coeficiente de segurança igual a 2 para os ensaios de placa, tornado assim a $\sigma_{adm} = 187,62$ kPa.

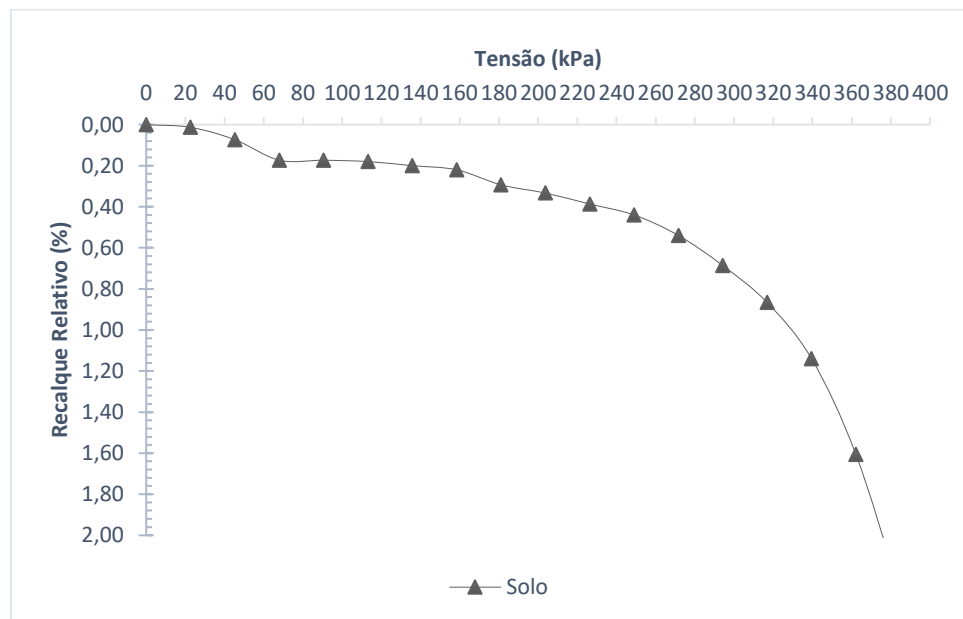


Figura 7 – Tensão vs Recalque Relativo do CP_01Branco

4.2 – Resultados do CP_02Branco

No CP_02Branco foram aplicadas 14 injeções de 70 litros de água por injeção, buscando simular o fluxo descendente e por consequência uma mudança na estrutura do solo, visando um estado comparativo mais apropriado em relação ao tratamento biocimentante. O resultado do ensaio de placa é apresentado na Figura 8, através do gráfico da “Tensão vs Recalque”.

Ainda pela análise da Figura 8 é possível identificar o critério de ruptura como: $\sigma_{ruptura} = 225$ kPa. Observa-se também que a resistência do corpo de prova em análise diminuiu em relação ao CP01_Branco. O resultado divergente se deve pela aplicação das referidas injeções, sendo o diminuto valor encontrado relacionado ao grau de saturação do solo no momento do ensaio, uma vez realizado um dia após a 14ª aplicação da injeção de água, com saturação elevada.

Em concordância com metodologia proposta para a determinação da capacidade de carga do CP02_Branco, é possível matematicamente através do gráfico da Figura 9 e equações matemáticas, a determinação da Tensão Admissível (σ_{adm}), sendo essa, $\sigma_{adm} = 188,78$ kPa, equivalente a uma carga de 83,4 kgf. Por motivos técnicos de segurança recomendados pela ABNT NBR 6122 (2010), adota-se então um coeficiente de segurança igual a 2 para os ensaios de placa, tornado assim a $\sigma_{adm} = 94,39$ kPa.

Tais resultados para o CP_02Branco indicam a redução de resistência do solo arenoso sob condições saturadas em relação ao CP_01Branco. Comparativo este que posteriormente é comparado também em relação ao corpo de prova biocimentado, salientando a diferença na aplicação da técnica de biocimentação em relação ao solo saturado e sob condições não saturadas.

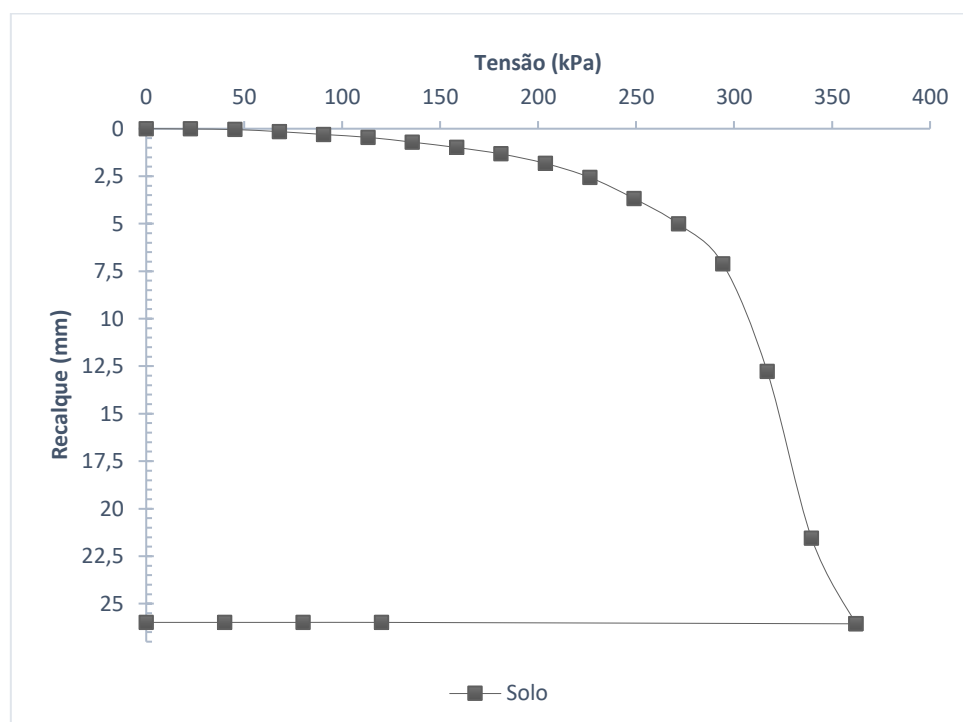


Figura 8 – Curva de Tensão vs Recalque do CP_02Branco

Em relação ao comportamento da “Tensão vs Recalque” do CP_02Branco, não demonstrou comportamento atípico, ou seja, a curva foi característica, com região de recompressão e compressão virgem, bem como o comportamento do solo no descarregamento.

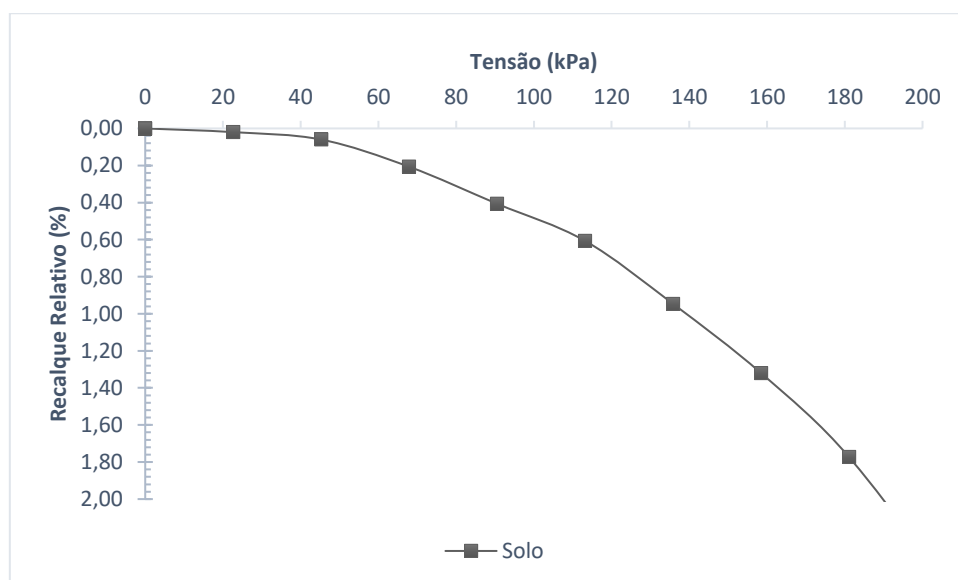


Figura 9 – Tensão vs Recalque Relativo do CP_02Branco

4.3 – Resultados do CP_03Biocimentado

O corpo de prova CP_03Biocimentado deveria ter recebido 14 injeções de 70 litros de água, conforme predisposição acadêmica. Porém, devido a diminuição da permeabilidade em virtude do efeito do tratamento da biocimentação, foram aplicadas 10 injeções de 70 litros e então a dosagem foi reduzida para 20 litros até o final das 14 injeções, fator este devido a redução da percolação da solução, por

consequente modificação da estrutura do solo. Logo após a aplicação da técnica MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation), o ensaio de placa foi realizado e a curva “Tensão vs Recalque” foi plotada, em concordância com a Figura 10. Logo, a Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) de 832,47 kPa foi encontrada, analisando o critério de ruptura (D/30).

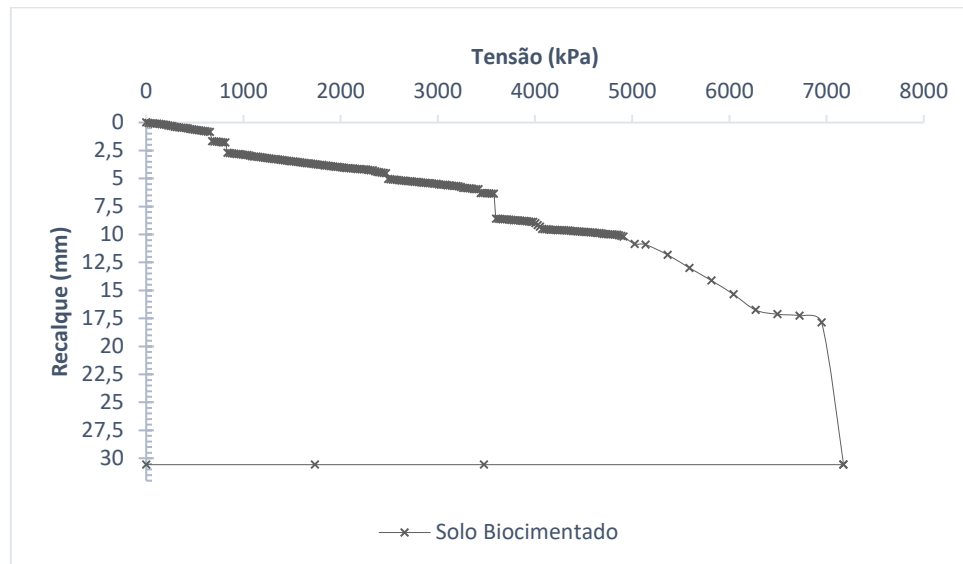


Figura 10 – Curva de Tensão vs Recalque do CP_03Biocimentado

A determinação da capacidade de carga do CP03_Biocimentado segue o mesmo critério proposto anteriormente. Sendo possível matematicamente através do gráfico da Figura 11 e equações matemáticas, a determinação da Tensão Admissível (σ_{adm}), sendo essa, $\sigma_{adm} = 674,42$ kPa, equivalente a uma carga de 297,95 kgf. Pelos mesmos motivos expostos anteriormente, adota-se um coeficiente de segurança igual a 2 para os ensaios de placa, tornando assim a $\sigma_{adm} = 337,21$ kPa.

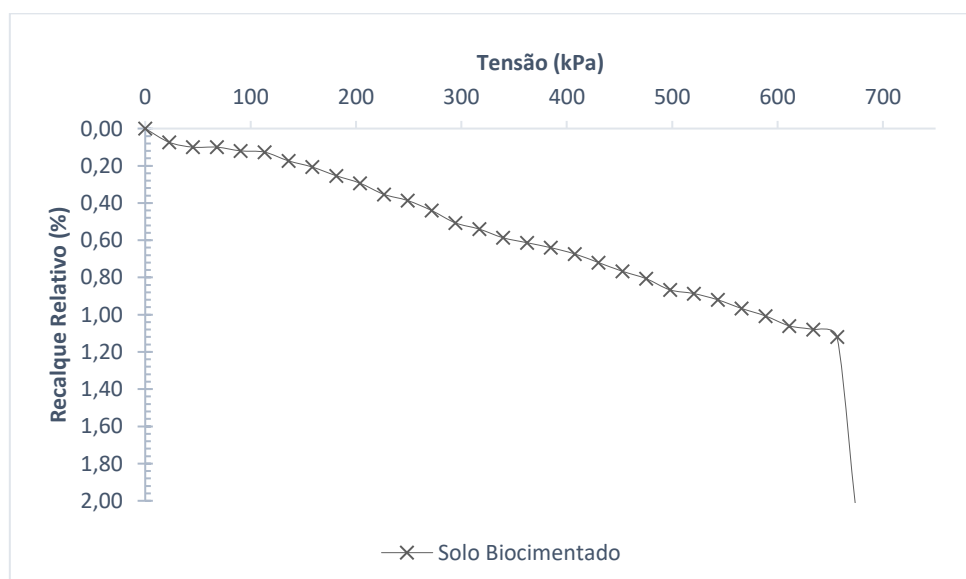


Figura 11 – Tensão vs Recalque Relativo CP_03Biocimentado

4.4 – Comparação dos Corpos de Prova

Para efeito comparativo, foi realizada a plotagem dos 3 ensaios de placa: CP_01Branco, CP_02Branco e CP_03Biocimentado, em concordância com a Figura 12. O efeito da técnica MICP é notável em comparação com o mesmo solo sem receber o tratamento.

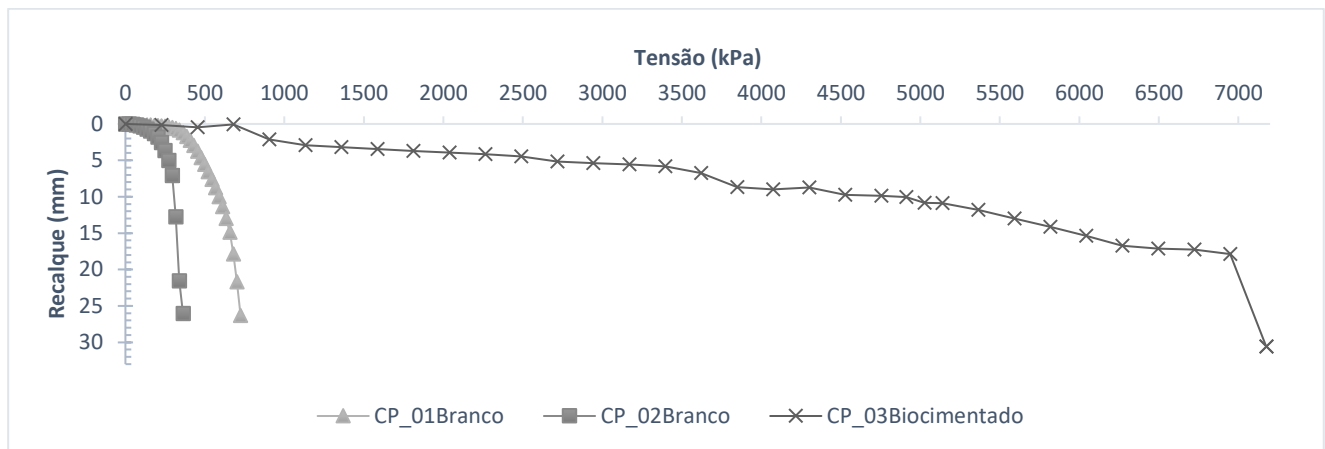


Figura 12 – Comparação dos Corpos de Prova

A técnica de biocimentação mostra-se eficiente no quesito de resistência mecânica do solo arenoso, diante aos fatores analisados de Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) e Tensão Admissível (σ_{adm}), como demonstrado através do Ensaio de Placa da Figura 12.

O presente sistema de melhoramento de solo, proporcionou um aumento da capacidade de carga do solo arenoso em estudo. Considerando a Figura 13 (a), houve um aumento da Tensão Admissível (σ_{adm}) do solo em 1,80 vezes, considerando o melhor comportamento do solo dentre os Corpos de Prova sem o tratamento biocimentante. Considerando a Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) dos Corpos de Prova, obteve-se um aumento da Tensão de Ruptura no CP03_Biocimentado em 2,03 vezes considerando o melhor comportamento dos corpos de prova sem o tratamento biocimentante, de acordo com a Figura 13 (b).

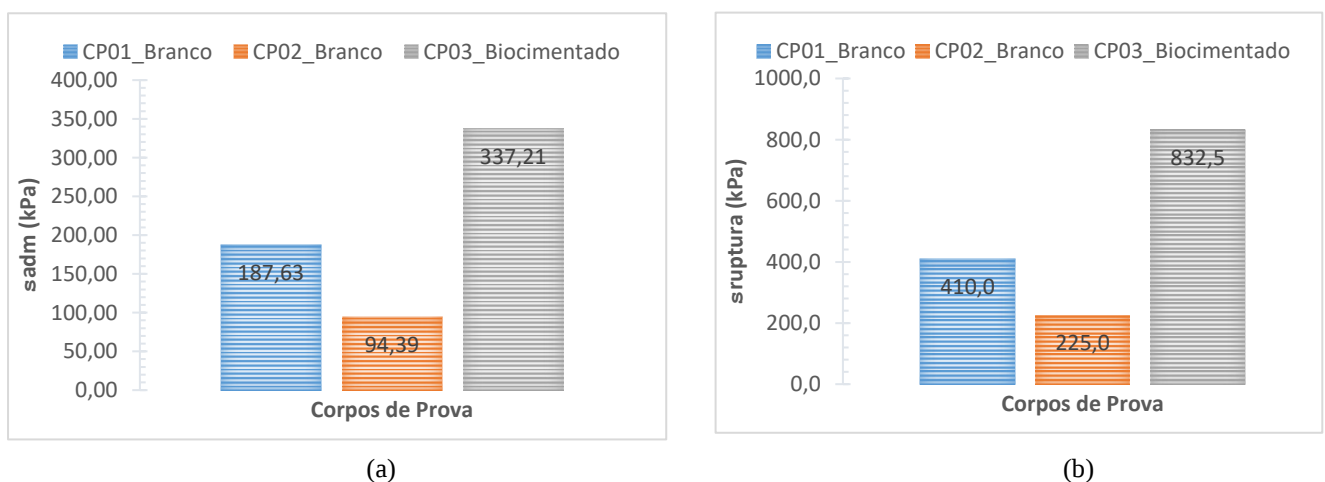


Figura 13 – a) Comparação da Tensão Admissível (σ_{adm}) dos Corpos de Prova; b) Comparação da Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) dos Corpos de Prova

Em relação a Carga Máxima (kgf) aplicada, de acordo com a Figura 14, o corpo de prova CP_03Biocimentado alcançou a magnitude de 3170 kgf, superando em 9,9 vezes a carga máxima aplicada no CP_01Branco e em 21,1 vezes a carga máxima aplicada no CP_02Branco, considerando os parâmetros do ensaio até atingindo os 25 mm de recalque predeterminados.

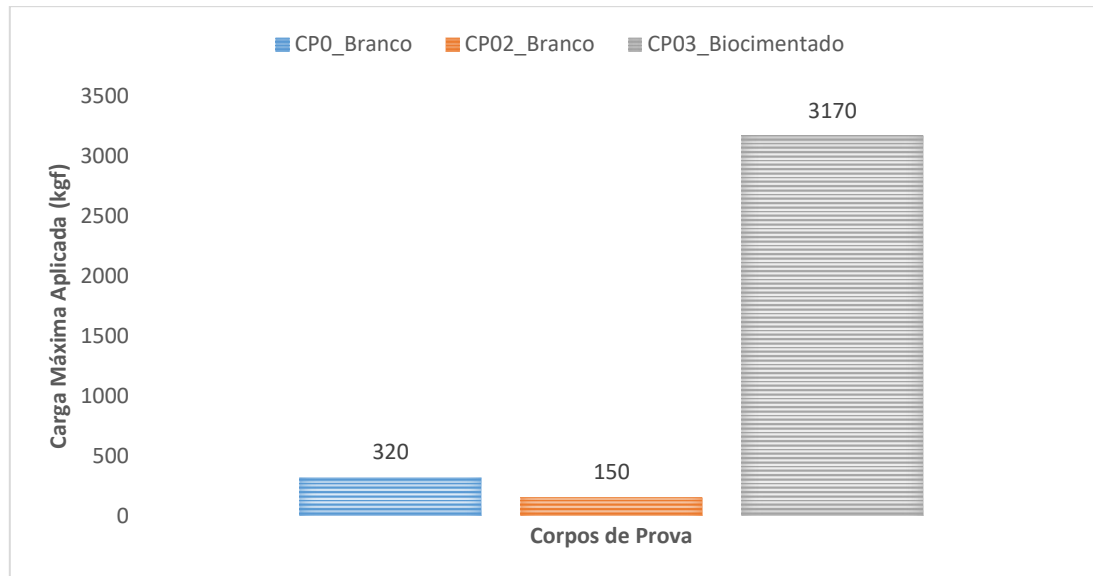


Figura 14 – Comparação da Carga Máxima aplicada nos Corpos de Prova

4.5 – Deformação das camadas

Através da exumação do CP03_Biocimentado após a realização do ensaio de placa, foi possível a avaliação das deformações absorvidas pelas camadas do corpo de prova. O efeito da técnica de biocimentação é extremamente notável no quesito de ganho de resistência, sendo assim as deformações foram propagadas ao longo das camadas superiores (as quais apresentaram maior teor de biocimentação, por análise tátil-visual, e quantificação de aumento de densidade) e apresentaram-se de forma sutil ao longo do corpo de prova.

O grau de precipitação de calcite é notável na camada superior, de acordo com a Figura 15 que representa o corte transversal do CP03_Biocimentado, evidenciando a formação da calcite, através da calcificação e surgimento de regiões esbranquiçadas (seta), juntamente com o consequente ganho de resistência do corpo de prova.



Figura 15 – Corte transversal do CP_03Biocimentado

Ainda, o CP_03Biocimentado não apresentou fissuras notáveis bem como ruptura ao cisalhamento, dessa forma juntamente com as deformações mínimas ocorridas, pode-se informar que o recalque ocorreu de forma integral do maciço de solo. Observa-se ainda que não houveram fissuras radiais na superfície do corpo de prova, evidenciando a alto índice de biocimentação, principalmente nas camadas superiores.

5. CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado pode-se concluir que o uso de microrganismos nativos da areia de Osório mostrou-se aplicável; a técnica de biocimentação é eficiente no quesito de resistência mecânica do solo arenoso, diante dos fatores analisados de Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) e Tensão Admissível (σ_{adm}), como demonstrado através do Ensaio de Placa comparativo da Figura 12. O presente sistema de melhoramento de solo, proporcionou aumento da capacidade de carga do solo arenoso em estudo, aumentando sua Tensão Admissível (σ_{adm}) em 1,80 vezes, considerando o melhor comportamento do solo dentre os corpos de prova sem tratamento da técnica MICP. Analisando a Tensão de Ruptura ($\sigma_{ruptura}$) dos corpos de prova, obteve-se um aumento da mesma no CP03_Biocimentado em 2,03 vezes, avaliando o melhor comportamento do solo dentre os corpos de prova sem biocimentação. Já em relação a carga máxima aplicada (kgf), obteve-se um aumento de 9,9 vezes em relação a carga máxima aplicada em relação ao CP_01Branco e de 21,1 vezes em relação ao CP_02Branco; até a paralização do ensaio de placa, ou seja, até atingir os 25 mm de recalque determinados pelo ensaio.

Ainda, conclui-se que o ganho de resistência através da aplicação da técnica MICP em solo arenoso, com microrganismos nativos do próprio solo é aplicável, uma vez buscando o aumento da capacidade de carga do solo.

Sobre o comportamento da estrutura do solo arenoso em relação a aplicação do ensaio de placa, nota-se que as deformações não foram claramente definidas ao longo das camadas, induzindo uma conclusão de que o recalque ocorreu de forma integral do maciço de solo. Ao mesmo tempo, observa-se a não ruptura por cisalhamento do corpo de prova.

E por fim, o processo de biocimentação envolve muitas variáveis, como: tempo de aplicação da solução biocimentante, concentração da solução, temperatura ambiente, atividade ureolítica, formas de cura dos corpos de prova e formas de aplicação da solução biocimentante. As quais devem ser definidas com base em estudos prévios para os experimentos futuros.

AGRADECIMENTOS

O autor principal agradece ao laboratorista Leunir Freitas pelo seu empenho e disponibilidade para a realização prática do trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Análise Granulométrica. Método de Ensaio. NBR 7181. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto e Execução de Fundações. NBR 6122. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Prova de Carga Direta sobre Terreno de Fundação. NBR 6489. Rio de Janeiro, 1984.

ACHAL, V.; PAN, X.; FU, Q.; ZHANG, D. Biomineralization based remediation of As(III) contaminated soil by *Sporosarcina ginsengisoli*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 201–202, p. 178–184, 2012.

ACHAL, V.; PAN, X. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 173, n. 1, p. 307–317, 2014.

AMARAKOON, G. G. N. N.; KAWASAKI, S. Factors Affecting Improvement of Sand Properties Treated with Microbially Induced Calcite Precipitation. In: Congress GeoChicago: Sustainability, Energy and the Geoenvironment, 2016. In Press.

ANBU, P.; KANG, C. H.; SHIN, Y. J.; SO, J. S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, p. 1–26, 2016.

CHOI, S. G.; WANG, K.; WEN, Z.; CHU, J. Mortar crack repair using microbial induced calcite precipitation method. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 209–221, 2017.

CRUZ, R. C. Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 218p. 2008.

DEJONG, J.T; FRITZGES, M.; NUSSTEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. **J Geotech Geoenviron Eng**, v. 32, p. 1381–1392, 2006.

GARBIN, R. G. Avaliação de biocimentação em solo arenoso. UPF. 2016. Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Curso de Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

GOMEZ, M. G.; ANDERSON, C. M.; GRADDY, C. M. R.; DEJONG, J. T.; NELSON, D. C.; GINN, T. R. Large-Scale Comparison of Bioaugmentation and Biostimulation Approaches for Biocementation of Sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 5, p. 04016124, 2017.

KANG, C. H.; HAN, S. H.; SHIN, Y.; OH, S. J.; SO, J. S. Bioremediation of Cd by microbially induced calcite precipitation. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 172, n. 6, p. 2907–2915, 2014.

KRAJEWSKA, B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. **Journal of Advanced Research**, 2017.

LI, X.; PENG, W.; JIA, Y.; LU, L.; FAN, W. Bioremediation of lead contaminated soil with *Rhodobacter sphaeroides*. **Chemosphere**, v. 156, p. 228–235, 2016.

MANI, D.; KUMAR, C. Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: An overview with special reference to phytoremediation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 3, p. 843–872, 2014.

MITCHELL, J. K.; SANTAMARINA, J. C. “Biological considerations in geotechnical engineering.” **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, v. 131, n. 10, p. 1222–1233, 2005.

MONTOYA, B. M. Bio-mediated soil improvement and the effect of cementation on the behavior, improvement, and performance of sand. California, Tese. 252 p. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. University of California. 2012.

MORTENSEN, B. M.; et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. **J Appl Microbiol**, v.111, p.338–349, 2011.

NG, W.; LEE, M.; HII, S. An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 62, n. 2, p. 723–729, 2012.

PAASSEN, L. A. VAN; GHOSE, R.; LINDEN, T. J. M. VAN DER; STAR, W. R. L. VAN DER; LOOSDRECHT, M. C. M. VAN. Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-Scale Biogrout Experiment. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 12, p. 1721–1728, 2010.

QABANY, A. AL; SOGA, K.; SANTAMARINA, C. Factors Affecting Efficiency of Microbially Induced Calcite Precipitation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 8, p. 992–1001, 2012.

STOCKS-FISCHER, S.; GALINAT, J. K.; BANG, S. S. Microbiological precipitation of CaCO_3 . **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1563–1571, 1999.

THOMÉ, A.; Comportamento de Fundações Superficiais Apoiadas em Aterros Estabilizados com Resíduos Industriais. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999.