

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**LORRAINE BRUNELE DA SILVA**

**ESTUDO SOBRE O PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE BIOCIMENTAÇÃO E SUAS  
INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS**

**FORMIGA-MG**

**2017**

LORRAINE BRUNELE DA SILVA

ESTUDO SOBRE O PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE BIOCIMENTAÇÃO E SUAS  
INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-  
MG, como requisito para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Espec. Laurêmia Soares  
da Silva.

FORMIGA-MG

2017

S586 Silva, Lorraine Brunele da.

Estudo sobre o princípio da técnica de Biocimentação e suas influências nas propriedades mecânicas dos solos / Lorraine Brunele da Silva. – 2017. 88 f.

Orientadora: Lauremia Soares da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)- Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2017.

1. Biocimentação. 2. Biomineralização dos solos. 3. Estabilização dos solos. I. Título.

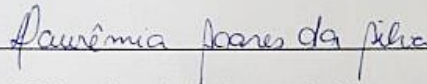
CDD 631.433

LORRAINE BRUNELE DA SILVA

ESTUDO SOBRE O PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE BIOCIMENTAÇÃO E SUAS  
INFLUÊNCIAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS

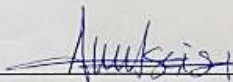
Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil do UNIFOR-  
MG, como requisito para obtenção do título  
de bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Espe. Laurêmia Soares da Silva

Orientadora



Prof.ª M.ª Aline Matos Leonel Assis

UNIFOR-MG



Prof. M. e Henrique Garcia Paulinelli

UNIFOR-MG

Formiga, 30 de outubro de 2017

*“O conflito não é entre o bem e o mal, mas entre o conhecimento e a ignorância”. Buda.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter sempre me dado perseverança e coragem de conquistar meus objetivos.

Agradeço a minha mãe, por todo incentivo e apoio, pelo carinho comigo e pela presença em minha vida.

Aos meus amigos que estiveram presentes durante minha caminhada: Mariane, Gabriela, agradeço todo o apoio ao longo do curso, e todos os momentos descontraídos.

As minhas amigas Dayane e Michele, agradeço a amizade, e Roberto agradeço sua presença e carinho.

Agradeço minha orientadora Laurêmia Soares, que acreditou em mim e me auxiliou com dedicação e profissionalismo.

## RESUMO

O estudo sobre o princípio da técnica de biocimentação de solos é recente. A área da geotecnia encontra-se em constante busca de novas técnicas para melhoramento de propriedades mecânicas do solo, visando a redução de impacto ambiental. Este estudo aborda sobre o princípio da técnica de biocimentação, que se baseia na indução de precipitação de carbonato de cálcio por entre os vazios do solo, se tratando portanto de uma técnica natural, sem impacto ambiental. A biocimentação também é encontrada em estudos pelos termos “precipitação de carbonato de cálcio no solo” e “biomineralização no solo”. Este trabalho abordou os estudos já realizados sobre a técnica de biocimentação, investigando as características dos solos que são influenciadas pelo método e apontando as possíveis aplicações geotécnicas. Diante do estudo bibliográfico concluiu-se que a biocimentação é viável para diversos fins geotécnicos de melhoramento de terrenos, sendo uma técnica promissora e recente, que traz ainda diferentes possibilidades de estudos futuros.

**Palavras-chave:** Biocimentação. Biomineralização. Bio estabilização dos solos.

## **ABSTRACT**

*The study on the basis of the technique of biocimentation of soils is recent. The area of geotechnics is constantly searching for new techniques to improve the mechanical properties of the soil, aiming at reducing environmental impact. This study deals with the context of the biocementation technique, which is based on the induction of calcium carbonate precipitation through the voids of the soil, thus being a natural technique with no environmental impact. Biocimentation is also found in studies by the terms "calcium carbonate precipitation in the soil" and "biomineralization in soil". This work has addressed the studies already carried out on the technique of biocimentation, investigating the soil characteristics that are influenced by the method and pointing out the possible geotechnical applications. With the bibliographical study it was concluded that biocimentation is feasible for several geotechnical purposes of land improvement, being a promising and recent technique, it still offers different possibilities for future studies.*

**Keywords:** *Biocimentation. Biomineralization. Soil stabilization.*



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AASHTO – Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

EICP - Precipitação do Carbonato de Cálcio por Indução de Enzimas

MCT – Miniatura compactada tropical

MEV – Microscópio eletrônico de varredura

MICP - Microbiologically Induced Calcite Precipitation

MIT – Instituto de Tecnologia de Massachusetts

NBR – Norma Brasileira

SUCS – Sistema Unificado de classificação dos solos

USDA – Departamento de Agricultura dos EUA

## LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Ca- cálcio

CaCl<sub>2</sub> - cloreto de cálcio

CaCO<sub>3</sub> – carbonato de cálcio

CO<sub>3</sub> - carbonato

g – gramas

g/L – grama por litro

H<sub>2</sub>NCONH<sub>2</sub> – ureia

H<sub>2</sub>O – água

Kg/m<sup>3</sup> - quilograma por metro cúbico

kPa – quilopascal

m – metro

m<sup>3</sup> - metro cúbico

mL – mililitro

mm – milímetro

mol/L – mol por litro

NaOH – hidróxido de sódio

pH – potencial de Hidrogênio

NH<sub>4</sub> – amônio

*Q* - vazão da água;

*S* - grau de saturação

*V* – volume

*W* – peso total da amostra de solo

*e* – índice de vazios do solo

*i* - gradiente hidráulico

*k* - coeficiente de permeabilidade do solo

*n* - porosidade

*w* - teor de umidade

$\gamma$  - peso específico do solo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação textural do USDA .....	22
Figura 2 - (a) Solo em estado natural; (b) três fases do solo.....	26
Figura 3 - Esquema do fluxo de água em uma amostra de solo .....	30
Figura 4 - Esquema da estrutura, composição e organização de um agregado do solo .....	32
Figura 5 - Biocimentação: a) solo sem tratamento; b) solo tratado por MICP .....	35
Figura 6 - Barragem de terra homogênea .....	43
Figura 7 - Barragem de terra com tapete impermeável de montante .....	44
Figura 8 - Porcentagem de volume do efluente drenado por dia em ensaio .....	49
Figura 9 - Desmoldagem dos corpos de prova CP_1 (a), CP_3 (b), CP_4 (c) e CP_controle (d) ensaiados.....	50
Figura 10 - Ruptura do corpo de prova CP_1 após tratamento do solo .....	51
Figura 11 - Desenho esquemático da coluna utilizada para o experimento de Costa (2016) .....	57
Figura 12- Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas de controle (16, 17 e 18) e as colunas contendo solo com carbonato de cálcio precipitado (1, 2 e 3) .....	60
Figura 13- Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetidos à técnica EICP com diferença de temperatura: 24 °C (1, 2 e 3) e 45 °C (4, 5 e 6) .....	60
Figura 14 - Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetido à precipitação do carbonato de cálcio (1, 2 e 3), carbonato de cálcio e bentonita (7, 8), carbonato de cálcio e goma guar (11) carbonato de cálcio, bentonia e goma guar (12) .....	61
Figura 15 - 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) .....	62
Figura 16 - Introdução do nutriente B4 na amostra do solo para ensaio .....	63
Figura 17 - Variação em profundidade dos índices físicos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem adição e com a adição do nutriente B4 .....	64
Figura 18 - Resultado da análise da geração de carbonato de cálcio (Ca) nas amostras do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutriente ....	66

Figura 19 - Imagens na lupa de alta resolução com luz natural da estrutura das camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, sem nutriente e com nutriente, aumentos de 100 vezes .....	67
Figura 20 - Imagens no MEV para quatro profundidades das amostras do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria com nutriente .....	70
Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão simples do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria .....	71
Figura 22 - Variação da resistência à compressão simples com a profundidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, tratado com nutrientes .....	71
Figura 23 - Montagem do ensaio de permeabilidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria .....	72
Figura 24 - Variação da permeabilidade com a profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutriente .....	73
Figura 25 - Imagens dos ensaios de desagregação após 24 horas de imersão (com inundação parcial e total) nas amostras dos perfis de solos da voçoroca de Santa Maria .....	74
Figura 26 - Montagem do ensaio de tratamento do solo por Paassen (2010): circulação dos fluídos através da areia entre os três furos de injeção, à esquerda e os três furos de extração, à direita .....	77
Figura 27 - Ensaio de tratamento do solo por Paassen (2010): (a) vista superior com fluxo de injeções; (b) volume de solo no final do melhoramento .....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Imagens MEV da amostra CP_ controle por Garbin .....	52
Quadro 2 - Imagens MEV da amostra CP_1 por Garbin .....	53
Quadro 3 - Imagens MEV da amostra CP_ 3 por Garbin .....	53
Quadro 4 - Imagens MEV da amostra CP_ 4 por Garbin .....	55
Quadro 54 - Imagens no MEV das diferentes camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutrientes, com aumento de 300 vezes. ....	68
Quadro 6 - Resumo das informações extraídas es estudos anteriores sobre biomineralização do solo .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificações do tamanho de partículas do solo .....	21
Tabela 2 – Influência das frações (areia, silte e argila) em algumas propriedades e comportamento dos solos .....	24
Tabela 3 – Valores típicos do coeficiente de permeabilidade para solos saturados .	31
Tabela 4 - Avaliação qualitativa de aplicações alternativas da biotecnologia a problemas geotécnicos .....	45
Tabela 5 - Composição da solução cimentante utilizada no tratamento do solo.....	48
Tabela 6 - Planejamento experimental das colunas de acordo com composição e temperatura .....	58
Tabela 7 - Valores utilizados para os cálculos dos coeficientes de permeabilidade de acordo com os provetes .....	59
Tabela 8 - Classificação pelo SUCS e pelo MCT para cada camada do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria com e sem nutriente .....	65
Tabela 9 - Resultados do ensaio de desagregação das amostras dos perfis de solo da voçoroca de Santa Maria, sem nutriente .....	75
Tabela 10 - Resultados do ensaio de desagregação das amostras dos perfis de solo da voçoroca de Santa Maria, com nutriente .....	76

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>18</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Características e propriedades do solo .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.1 Composição química e mineralógica dos solos .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.2 Textura do solo e distribuição do tamanho de partículas .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.3 Estrutura do solo e suas influências .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.4 Principais relações entre as fases do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.5 Permeabilidade do solo .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1.6 Microbiologia do solo .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Biotecnologia aplicada ao estudo do solo .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.1 Biomineralização.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.2 Biocimentação .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2.2.1 Processo químico e microbiológico .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.2.2 Fatores que influenciam a atividade das bactérias .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2.2.3 Vantagens da técnica de biocimentação .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2.4 Possíveis aplicações geotécnicas da biocimentação .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2.4.1 Influência em fundações .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2.4.2 Controle de processos erosivos.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.2.4.3 Obras de terra .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.2.4.4 Outras aplicações.....</b>	<b>44</b>
<b>5 METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Dados investigativos .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.1 Estudo A: Estudo de biocimentação em solo arenoso (GARBIN, 2016) ..</b>	<b>47</b>
<b>5.1.2 Estudo B: Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante par aestabilização do solo (COSTA, 2016) .....</b>	<b>56</b>

<b>5.1.3 Estudo C: Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos (GONZÁLEZ, 2009) .....</b>	<b>62</b>
<b>5.1.4 Estudo D: Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogrout experiment (PAASSEN et al., 2010) .....</b>	<b>77</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1 Permeabilidade .....</b>	<b>81</b>
<b>6.2 Resistência à compressão simples .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3 Presença de precipitado de carbonato de cálcio .....</b>	<b>82</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A biocimentação é uma alternativa para melhoramento das propriedades mecânicas do solo, que consiste no uso de microorganismos, nutrientes e processos biológicos naturais presentes no solo, ou seja, uma alternativa sustentável. Através da introdução de substâncias específicas ao terreno, ocorre a reação de precipitação de calcita, que preenche os espaços vazios do solo e conseqüentemente traz influências nas características mecânicas do solo.

O estudo é pertinente, tendo em vista o grande número de obras civis na área de geotecnia, juntamente com a constante busca por técnicas ecológicas e inovadoras. As técnicas atuais podem por vezes serem insuficientes em algumas especificações como por exemplo controle de processos erosivos. As técnicas tradicionais de reforço de solo, como por exemplo o método jet grouting, ou outros métodos de injeções, usufruem de elevada energia mecânica e utilização de materiais sintéticos, causando efeito negativo devido à emissão de dióxido de carbono para produção de cimento por exemplo. Por vezes, as técnicas tradicionais que utilizam vibrocompactação ou adição de materiais sintéticos ao solo, acarretam a movimentos indevidos de terra, causando danos ao terreno.

A biocimentação é uma técnica natural e não causa danos ambientais. Muitas das vezes, os tratamentos de solos impermeabilizam o solo em sua totalidade, o que pode não ser o desejado por não ter um caminho ideal para a precolação da água, causando danos. A biocimentação diminui a permeabilidade do solo, mas não em sua totalidade, podendo ser utilizadas em obras com esse objetivo. Ainda assim, quando o intuito é realmente chegar a uma total impermeabilização, é possível adicionar substâncias específicas junto ao tratamento do solo, onde se consegue chegar a impermeabilização integral.

A biocimentação também possui a característica de melhoramento da estabilidade do solo, visto que os espaços vazios do solo são preenchidos por precipitados de carbonato de cálcio, diminuindo o índice de vazios do solo, apresentando então um solo com mais constituintes sólidos. Por esse motivo a técnica pode ser utilizada para fins de melhoramento de comportamento mecânico do solo.

## **2 OBJETIVOS**

Esse tópico tem por finalidade retratar quais são os objetivos do presente trabalho, sendo eles objetivo geral e objetivos específicos, conforme descritos a seguir.

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desse projeto é abordar o processo biocimentação como técnica eficaz de melhoramento do solo, investigando suas influências no comportamento mecânico dos solos.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desse projeto são:

- Apresentar a técnica de biocimentação e seus processos químicos envolvidos;
- Abordar o método de execução da técnica de biocimentação, bem como suas vantagens e dificuldades.
- Abordar os estudos já realizados dentro do contexto da biocimentação;
- Investigar as influências da biocimentação nas propriedades mecânicas do solo, como resistência e permeabilidade.

### 3 JUSTIFICATIVA

O projeto tem o intuito de abordar sobre a técnica de biocimentação, utilizada para melhoramento mecânico do solo. Trata-se de uma técnica alternativa, que utiliza de processos biológicos naturais, o que faz com a técnica seja sustentável. O estudo é pertinente tendo em vista o grande crescimento de obras civis na área da geotecnia, junto com a constante busca por técnicas ecológicas e inovadoras.

Toda obra civil tem por princípio a utilização do terreno, bem como o estudo desse para análise dos elementos estruturais. Os terrenos adequados para obras civis devem ter a característica de suportar as cargas da futura obra, sendo que em muitos casos os solos não possuem essa capacidade de suporte para obra civil, sendo necessário então a busca por melhoramento do solo.

No Brasil, há uma grande variedade em tipos de solos, podendo ocorrer em um mesmo terreno a presença de solos com propriedades totalmente distintas em diferentes profundidades. Por esses motivos torna-se necessário o conhecimento do comportamento dos solos, assim como a busca por soluções de tratamentos de solos, onde se procura o melhoramento do comportamento mecânico, sem prejudicar o meio ambiente.

Esse trabalho aborda a técnica de biocimentação, que pode ser aplicada em solos onde se tem a finalidade de melhorar propriedades mecânicas do solo, como aumentar a resistência e diminuir a permeabilidade. A biocimentação possibilita a redução do impacto ambiental e oferece a possibilidade de interatuação em diferentes áreas como a geotecnia, trazendo soluções para diversos problemas de engenharia

## **4 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção foram abordados os contextos relevantes para a elaboração do trabalho. Por meio de pesquisas em literaturas existentes, trabalhos de conclusão de cursos, teses de mesrado, teses de doutorado, artigos acadêmicos e experimentos já realizados, foi alcançado esse embasamento teórico.

### **4.1 Características e propriedades dos solos**

Para amplo entendimento do processo de biocimentação no solo, é necessário a compreensão de diversas características e propriedades dos solos.

As obras de Engenharia Civil assentam-se sobre o solo, ou seja, o terreno, e inevitavelmente é necessário a análise do comportamento deste (PINTO, 2006). Os solos são formados, de modo geral, a partir do intemperismo das rochas, e suas propriedades físicas são determinadas pelos minerais que constituem suas partículas (DAS, 2011).

Segundo Craig (2012, p.1) “solo é qualquer reunião de partículas minerais soltas, ou fracamente unidas (cimentadas), formada pela decomposição de rochas por ação do intemperismo, com o espaço vazio entre as partículas ocupado por água e/ou ar”.

Paula (2007, p. 2) afirma que “o solo, na engenharia civil, é um material de construção muito estudado para realização de uma obra”.

É relevante o conhecimento das características do solo, a fim de reconhecer as técnicas que apresentam melhor viabilidade para determinadas finalidades no contexto da construção civil. O conhecimento da diversidade do solo é necessário para que este seja utilizado como base para edificações seguras (BRADY; WEIL, 2009).

#### **4.1.1 Composição química e mineralógica dos solos**

De acordo com Caputo (2012), os minerais constituintes de um solo são os mesmos encontrados nas rochas de origem e também aqueles que se formam na decomposição. Os minerais são formados a partir de processos físicos e químicos que agem na crosta terrestre, logo são compostos químicos naturais (LEPSCH,

2011). Os minerais são caracterizados de acordo com a estrutura interna de seus íons (cátions e ânions) e também pela sua composição química, que varia de acordo com características de seus átomos, o que representa diversos grupos de minerais (MELO; ALLEONI, 2009).

Os principais grupos em relação à composição química dos principais componentes dos solos são: os silicatos (feldspato, mica, quartzo, clorita, talco), os óxidos (hematita, magnetita, limonita), carbonatos (calcita, dolomita), e os sulfatos (gesso, anidrita). Nas partículas maiores, o mineral mais comum encontrado, geralmente é o quartzo, “é bastante resistente à desagregação e forma grãos de siltes e areias. Sua composição é simples,  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício), as partículas são equidimensionais, como cubos ou esferas, e apresentam baixa atividade superficial” (PINTO, 2006, p. 16). Em solos desenvolvidos de rochas calcárias, ocorre calcita e dolomita.

Os feldspatos dão origem aos argilominerais, que constituem a fração mais fina dos solos e possuem estrutura complexa. Além do reduzido tamanho dessas partículas, a constituição mineralógica faz com que elas tenham um comportamento totalmente diferenciado em relação ao dos grãos de silte e areia (PINTO, 2006). Nas frações de argila ocorre principalmente argilominerais, que possuem partículas de tamanho muito pequeno e estrutura complexa (CURI; KAMPF, 2015). As frações argilosas possuem partículas com menores dimensões, e apresenta complexa constituição química (CAPUTO, 2012). Os principais minerais componentes dos solos argilosos são as caolinitas, as montmorilonitas e as illitas (ALMEIDA, 2005).

#### **4.1.2 Textura do solo e distribuição do tamanho de partículas**

O tamanho das partículas do solo é uma das características que o diferencia. A diversidade do tamanho dos grãos é enorme, sendo que algumas partículas podem ser identificadas pelo simples manuseio do solo (PINTO, 2006). Reinert e Reichert (2006) afirmam que a proporção relativa dos diferentes tamanhos de partículas de um solo é a definição de textura do solo. Das (2011) afirma que o tamanho das partículas componentes do solo possui grande variação, podendo ser pedregulhos, areia, silte ou argila e que o solo recebe sua denominação de acordo com o tamanho predominante das partículas presentes.

Foram desenvolvidos vários sistemas de classificação do tamanho das partículas do solo por diferentes organizações e muitos deles são utilizadas até hoje. Apesar da existência de diversos sistemas de classificação, nenhum é totalmente definitivo para todos os elementos e suas aplicações, pois cada solo possui grande diversidade de propriedades. Observa-se pela TAB. 1 as classificações de tamanho de partículas desenvolvidas pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), pela Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO), pelo Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers) e pelo Bureau de Reclamações dos Estados Unidos (U.S. Bureau of Reclamation).

Tabela 1 – Classificações do tamanho de partículas do solo.

Nome da organização	Tamanho do grão (mm)			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA)	>2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
Associação Americana de Rodovias Estaduais e Autoridades de Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Classificação de Solos (Corpo de Engenharia do Exército dos Estados Unidos, Bureau de Reclamações dos Estados Unidos e Sociedade Americana para Testes e Materiais)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Grãos finos (por exemplo, siltes e argilas) <0,075	

Fonte: DAS, 2011, p. 19.

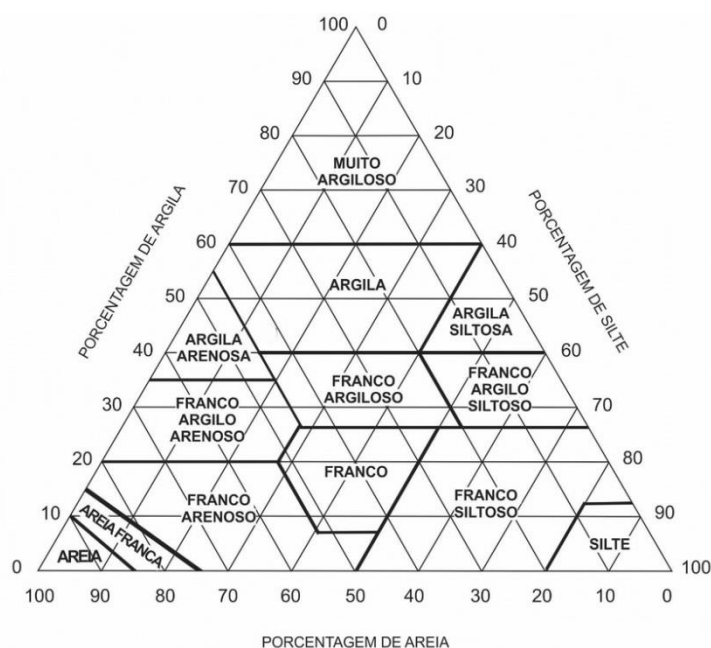
De acordo com a TAB. 1, as partículas podem ser divididas em pedregulho, areia, silte e argila. Porém os solos naturais geralmente são a mistura de partículas de diversos tamanhos. No sistema de classificação textural, os solos são

caracterizados a partir de seus componentes principais como argila arenosa, argila siltosa e assim por diante (DAS, 2011). A análise da textura feita no laboratório consiste em ensaios com amostra de solo. A distribuição das partículas grossas do solo, pode ser determinada pelo método de peneiramento (REINERT e REICHERT, 2006).

A amostra de solo é colocada para peneiramento, no qual consiste em uma série de peneiras padrão de testes com tamanhos de malha sucessivamente menores. A quantidade de solo retida em cada peneira é determinada, assim como a porcentagem cumulativa de massa que passa em cada peneira. O método de sedimentação é usado para determinar a distribuição das partículas mais finas, no qual as partículas esféricas se depositam em uma suspensão. Nesse método, é analisada a velocidade de deposição: quanto maior a partícula, maior a velocidade de deposição (CRAIG, 2012).

Assim como a classificação do tamanho de partículas, também existem diversos sistemas de classificação textural por diferentes organizações. A FIG.1 apresenta os sistemas de classificação textural desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), também conhecido como triângulo de Feret, no qual o método de classificação é baseado nas definições granulométricas.

Figura 1 – Classificação textural do USDA.



Fonte: DAS, 2011, p. 84.

A utilização do quadro consiste na análise das porcentagens de cada constituição de partículas do solo. O solo pode ser constituído por areia, silte e argila, no qual a soma das porcentagens destas três frações é 100%. Cada lado do triângulo é dividido em segmentos representando a porcentagem correspondente à respectiva fração, areia, argila e silte, em um sentido previamente estabelecido. O ponto de união da porcentagem de cada fração representa a classificação da textura do solo.

Os grãos minerais mais grosseiros são geralmente agregados e cobertos por argila e outros minerais coloidais. Cascalhos, matacões e outros fragmentos maiores que 2 mm de diâmetro podem interferir no comportamento do solo, porém eles não são considerados como parte da fração terra fina, para a qual o termo textura do solo é aplicado. (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017)

Pedregulhos são fragmentos de rochas com partículas de quartzo, feldspato e outros minerais. Já as partículas de areia também são constituídas por quartzo e feldspato porém contam com a presença de outros grãos mineirais (PINTO, 2006). “Nos pedregulhos e areias os grãos são arredondados e angulosos, sempre de forma aproximadamente esférica” (VARGAS, 1977, p. 17). As partículas de areia são relativamente grandes, logo também possui um diâmetro entre os poros também relativamente grande. Os solos arenosos não conseguem reter água contra a força da gravidade, devido aos seus poros largos e, assim, drenam rapidamente e ocasionam entrada de ar no solo. Devido ao maior tamanho das partículas de areia, ela possui superfície específica baixa. Portanto, apresentam pequena capacidade de retenção de água ou nutrientes e não se mantêm unidas em uma massa coerente (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017).

Segundo Das (2011, p. 19) “siltos são frações de solo microscópicas que consistem em grãos de quartzo bem refinados e algumas partículas em forma de placas, que são fragmentos de minerais micáceos”. O material siltoso possui poros menores e mais numerosos em relação aos poros presentes entre as partículas de areia, o que faz com que o silte retém água e permite menor taxa de drenagem. O material siltoso pode possuir baixa plasticidade, coesão e capacidade de adsorção, devido a adesão de filmes de argila à superfície das partículas. Devido a essa baixa plasticidade e plasticidade, os solos com grandes quantidades de silte e areia fina podem ser predispostos à erosão eólica e hídrica (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017).



Argilas são formadas principalmente por partículas lamelares, microscópicas e submicroscópicas de mica, argilominerais e outros minerais (CRAIG, 2012). Possuem grande área superficial específica e os poros entre as partículas são pequenos e irregulares, causando movimento lento de água e ar no solo. Os poros entre as partículas dos solos argilosos possuem tamanho pequeno, porém são numerosos, o que permite que o solo retenha grande quantidade de água (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017). As frações do solo podem influenciar em diversos comportamentos dos solos, como mostra a TAB. 2.

Tabela 2 – Influência das frações (areia, silte e argila) em algumas propriedades e comportamento dos solos.

Propriedades/Comportamento do solo	Areia	Silte	Argila
Capacidade de retenção de água	Baixa	Média a alta	Alta
Aeração	Boa	Média	Pobre
Taxa de drenagem	Alta	Lenta a média	Muito lenta
Teor de matéria orgânica no solo	Baixo	Médio a alto	Alto a médio
Decomposição da matéria orgânica	Rápida	Média	Lenta
Aquecimento na primavera	Rápido	Moderado	Lento
Susceptibilidade à compressão	Baixa	Média	Alta
Susceptibilidade a erosão eólica	Moderada	Alta	Baixa
Susceptibilidade a erosão hídica	Baixa	Alta	Solo agregado – baixa Solo não agregado – alta
Potencial de expansão e contração	Muito baixo	Baixo	Moderado a muito alto
Adequabilidade para construção de represas e aterros	Baixa	Baixa	Alta
Capacidade de cultivo após chuva	Boa	Médio	Baixa
Potencial de lixiviação de poluentes	Alto	Média	Baixo
Capacidade de armazenamento de nutrientes	Baixa	Média a alta	Alta
Resistência à mudança de pH	Baixa	Média	Alta

Fonte: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017.

#### 4.1.3 Estrutura do solo e suas influências

Caputo (2012) mostra que o solo é constituído por um conjunto de partículas, ou seja, grãos minerais, podendo conter matéria orgânica ou não, e deixando entre si espaços vazios, que podem estar preenchidos parcial ou totalmente com água. Da

mesma forma, Curi e Kampf (2015) afirmam que existem espaços vazios, ou poros, entre as partículas do solo, que podem conter água ou ar. Paula (2007) afirma que, para fins de engenharia, o solo é uma estrutura que possui partículas sólidas interligadas e também por vazios, que são geralmente preenchidos com ar e água.

De acordo com Lepsch (2011), a porosidade do solo, juntamente com o arranjo das partículas e suas características como tamanho e forma são o que formam a estrutura do solo. Também afirma que a estrutura do solo se refere ao tamanho, formato dos poros e também o arranjo das partículas do solo.

A estrutura do solo refere-se ao agrupamento e organização das partículas do solo em agregados e relaciona-se com a distribuição das partículas e agregados num volume de solo. Considerando que o espaço poroso é de importância similar ao espaço sólido, a estrutura do solo pode ser definida também pelo arranjo de poros pequenos, médios e grandes, com consequência da organização das partículas e agregados dos solos (REINERT; REICHERT, 2006, p. 5).

De acordo com Reinert e Reichert (2006), a criação de poros no solo existe quando ocorre a organização de partículas em agregados e que o tamanho das partículas é relacionado com a origem do tamanho dos poros. Em solos argilosos, geralmente predomina-se microporos, já em solos arenosos, a predominância é de macroporos.

Quando se reduz a porosidade do solo, a resistência da estrutura é ampliada, pois além de se observar um aumento no valor da densidade, os poros são reduzidos e a fase sólida ocupa maior parte do volume (LEPCSH, 2011).

Os vazios da estrutura do solo retêm água, influenciando também na permeabilidade, taxas de infiltração e na retenção de água no solo (CURI; KAMPF, 2015).

Logo, observa-se que um solo poroso, ou seja, com grande índice de vazios, é bom para utilização de fins agropecuários, ao contrário dos solos compactos, que não são apropriados para a agricultura, porém é super conveniente para obras civis (INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (IFRN), 2017).

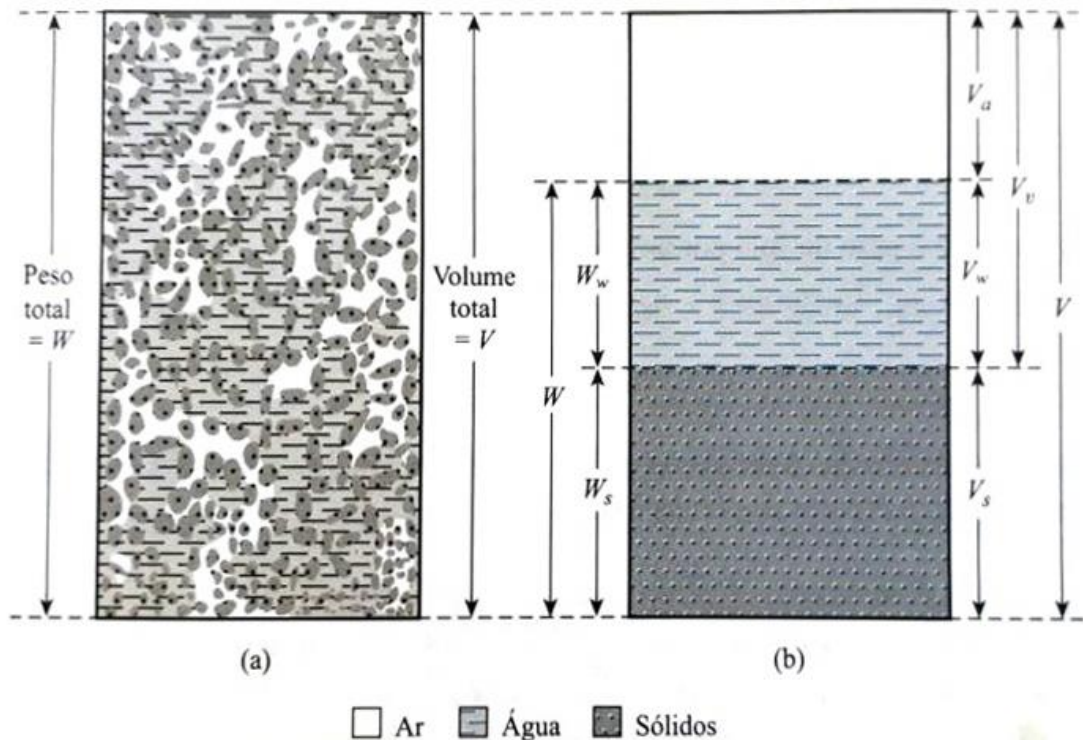
#### **4.1.4 Principais relações entre as fases do solo**

O solo é constituído por partículas sólidas, formando uma estrutura. O volume restante é ocupado por água e ar, ou seja, o solo é constituído de três fases:

partículas sólidas, água e ar. O comportamento de um solo tem relação com a quantidade relativa de cada uma dessas três fases (PINTO, 2006).

A FIG.2 mostra as relações de volume e peso de uma amostra de solo em estado natural e suas três fases separadas esquematicamente, com volume  $V$  e peso  $W$ .

Figura 25 – (a) Solo em estado natural; (b) três fases do solo.



Fonte: PINTO, 2006, adaptado.

Diante do conhecimento das relações entre as fases do solo, é possível analisar diversas características do solo, como índice de vazios, porosidade, entre outros, o que auxilia nas atividades geotécnicas (DAS, 2011).

O volume total ( $V$ ) de uma amostra de solo é dado pela Equação 1:

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (1)$$

onde:

$V_s$  - volume de sólidos no solo;

$V_v$  - volume de vazios;

$V_w$  - volume de água nos vazios;

$V_a$  - volume de ar nos vazios.

“Como a massa específica do ar é muito pequena ( $1,20 \text{ Kg/m}^3$ ) quando comparada às massas específicas da água e dos sólidos, a massa da fase gasosa será sempre desprezada no cálculo da massa do solo” (NOGUEIRA, 1988, p. 35). Supondo então que o peso do ar seja desprezível, obtém-se o peso total ( $W$ ) da amostra pela Equação 2:

$$W = W_s + W_w \quad (2)$$

onde:

$W_s$  - peso dos sólidos do solo;

$W_w$  - peso da água.

Segundo Craig (2012), para identificar o estado do solo, são utilizados índices que correlacionam os pesos e os volumes das fases do solo. O índice de vazios ( $e$ ) é a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos, apresentado pela Equação 3.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3)$$

A porosidade ( $n$ ) é a razão entre o volume de vazios e o volume total do solo, como mostra a Equação 4.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (4)$$

O índice de vazios e a porosidade estão inter-relacionados, como mostra a Equação 5 e 6.

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (5)$$

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (6)$$

O grau de saturação ( $S$ ) é a relação entre o volume de água e o volume de vazios, como mostra a Equação 7, é geralmente expresso em percentagem e pode variar entre os limites de zero para um solo completamente seco a 100% para um solo completamente saturado.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (7)$$

O teor de umidade ( $w$ ) é definido pela relação entre o peso da água e o peso dos sólidos, como apresenta a Equação 8.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (8)$$

O peso específico do solo ( $\gamma$ ) é a relação entre o peso do solo por unidade de volume, dado na Equação 9.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (9)$$

As relações apresentadas, de acordo com Caputo (2012, p. 39) “desempenham um importante papel no estudo das propriedades dos solos, uma vez que estas dependem dos seus constituintes e das proporções relativas entre elas, assim como da interação de uma fase sobre as outras”. A partir dessas principais relações peso e volume, é possível ainda calcular outros índices.

Em princípio, as quantidades de água e ar podem variar. A evaporação pode diminuir a quantidade de água, substituindo-a por ar, e a compressão do solo pode provocar a saída de água e ar, reduzindo o volume de vazios. O solo, no que se refere às partículas que o constituem, permanece o mesmo, mas seu estado se altera. As diversas propriedades do solo dependem do estado em que se encontra. Quando diminui o volume de vazios, por exemplo, a resistência aumenta (PINTO, 2006, p. 36).

#### 4.1.5 Permeabilidade do solo

A água ocupa os vazios do solo e descola-se em seu interior. Há um grande número de problemas práticos que no qual o estudo da permeabilidade é envolvido, como por exemplo o cálculo das vazões para estimativa de água que infiltra em uma escavação, a análise de recalques e também o estudo da estabilidade do solo (PINTO, 2006).

De acordo com Caputo (2012), o coeficiente de permeabilidade varia de acordo com a temperatura e com o índice de vazios do solo. A temperatura influencia a viscosidade da água, tornando mais ou menos fácil de escoar pelos poros do solo. Quanto maior o índice de vazios do solo, maior o coeficiente de permeabilidade.

Darcy, em 1856, verificou como diversos fatores influenciavam a vazão da água pelo solo, baseando no seu experimento com permeâmetro, e propôs a seguinte relação empírica, dada pela Equação 10 (MASSAD, 2010).

$$Q = k \times i \times A \quad (10)$$

Onde:

$Q$ - vazão da água;

$k$ - coeficiente de permeabilidade do solo;

$i$ - gradiente hidráulico;

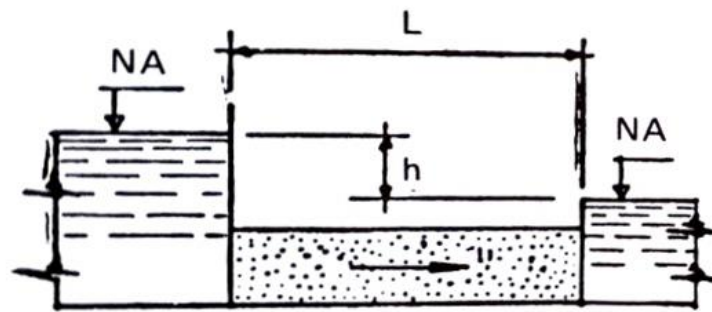
$A$ - área da seção transversal do permeâmetro.

Segundo Pinto (2006), o gradiente hidráulico ( $i$ ) é a relação entre a perda de carga total ( $h$ ) pela distância da qual a carga se dissipa ( $L$ ), representado pela Equação 11.

$$i = \frac{h}{L} \quad (11)$$

A FIG.3 mostra o fluxo de água em uma amostra de solo.

Figura 36 – Esquema do fluxo de água em uma amostra de solo.



Fonte: CAPUTO, 2012.

O coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), também conhecido por condutividade hidráulica, depende de diversos fatores, como viscosidade do fluido, arranjo das dimensões dos poros, distribuição granulométrica, índice de vazios, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo (DAS, 2011).

O coeficiente de permeabilidade depende principalmente do tamanho médio dos poros, o que por sua vez está relacionado com a distribuição do tamanho das partículas, a forma das partículas e a estrutura do solo. Geralmente, quanto menores as partículas, menores serão o tamanho médio dos poros e o coeficiente de permeabilidade. A presença de uma pequena porcentagem de finos em um solo de granulação grossa resulta em um valor de  $k$  significativamente menor do que o valor para o mesmo solo sem a presença de finos. Para um determinado solo, o coeficiente de permeabilidade é uma função do índice de vazios. [...] O coeficiente de permeabilidade também varia com a temperatura, da qual a viscosidade da água depende (CRAIG, 2012, p. 26).

Existem diversas maneiras para a determinação do coeficiente de permeabilidade, como por meio de fórmulas que o relacionam com a granulometria, no laboratório utilizando-se os permeômetros de carga constante ou de carga variável e *in loco* pelo ensaio de bombeamento ou pelo ensaio de tubo aberto (CAPUTO, 2012). A TAB. 3 apresenta alguns valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos saturados.

Tabela 3 – Valores típicos do coeficiente de permeabilidade para solos saturados.

Tipo de solo	$k$ cm/s
Pedregulho limpo	100 – 1,0
Areia grossa	1,0 – 0,01
Areia fina	0,01 – 0,001
Argila siltosa	0,001 – 0,00001
Argila	<0,000001

Fonte: DAS, 2011, p. 147.

#### 4.1.6 Microbiologia do solo

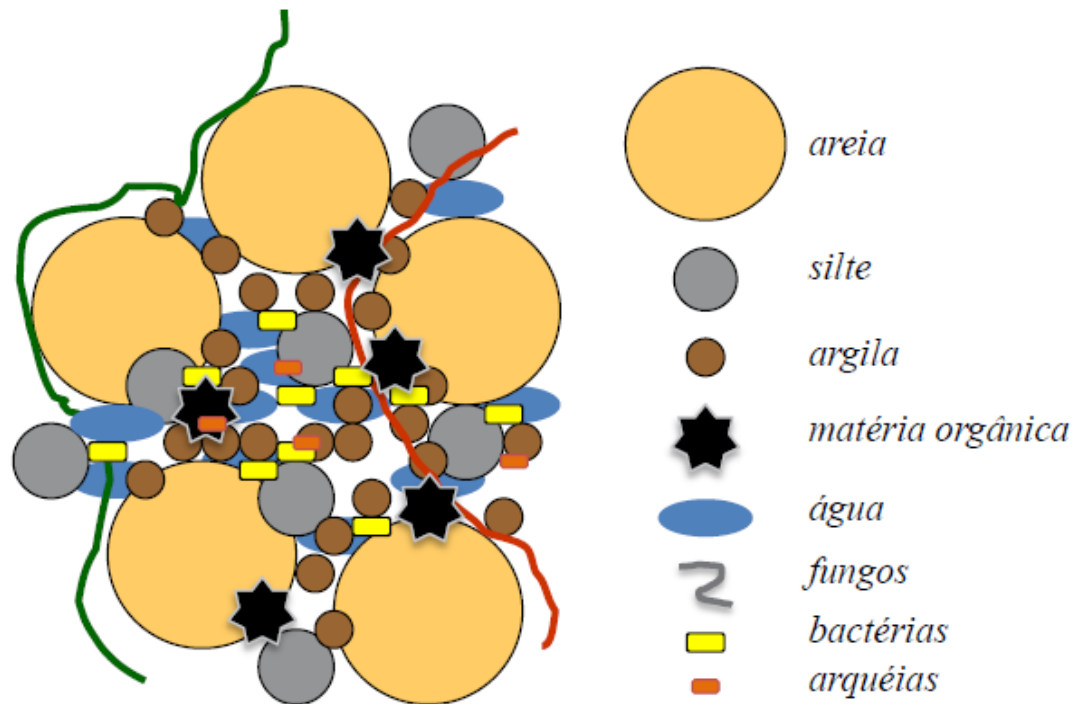
A microbiologia do solo aborda o estudo dos microorganismos que se encontram nesse ambiente, assim como suas atividades e como eles afetam as propriedades do solo (SOCIEDADE BRASILEIRA DE MICROBIOLOGIA (SBM), 2017). “O solo pode ser entendido como um material composto de minerais, gases, água, substâncias orgânicas e microorganismos” (BRADY; WEIL, 2009, p. 10).

Há diversos grupos de microorganismos presentes no solo, dentro os principais: bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários. As bactérias formam o grupo de microorganismos de maior abundância e variedade entre as espécies. As bactérias do solo possuem uma alta taxa de crescimento e alta capacidade de decomposição dos diversos substratos presentes no solo (CARDOSO et al., 1992).

De acordo com Moreira e Siqueira (2006), as diferentes frações de areia, argila e silte formam os agregados do solo, que funcionam como um suporte físico para a aderência microbiana, e oferecem condições distintas de aeração, além de disponibilidade de nutrientes que viabilizam a coexistência de milhares de microorganismos assim como suas atividades metabólicas. A FIG. 4 apresenta um esquema da estrutura e composição dos agregados de um solo.



Figura 4 – Esquema da estrutura, composição e organização de um agregado do solo.



Fonte: CARDOSO & ANDREOTE, 2016, p.45.

Gonzalez (2009), afirma que a atividade que os microorganismos exercem no solo, pode estar correlacionada à estrutura desse solo. Existe a possibilidade de adesão das células microbianas a partículas do solo. Essa adesão tem natureza química e mediada por substâncias cimentantes.

O solo pode ser caracterizado como um ótimo e complexo habitat microbiano, possui inúmeras populações de todos os tipos de microorganismos além de se tratar como reservatório final de diversidade genética de quase todos eles. (CARDOSO; NEVES, 1992). “O estudo da microbiota do solo é tão vasto quanto desconhecido, devido ao fato de o solo ser um habitat externamente peculiar em relação a outros habitats terrestres, por sua natureza heterogênea, complexa e dinâmica” (GONZALEZ, 2009, p. 6).

## 4.2 Biotecnologia aplicada ao estudo do solo

Biotecnologia se caracteriza como “toda aplicação tecnológica que utilize sistemas biológicos, organismos vivos, ou seus derivados, para fabricar ou modificar produtos ou processos para utilização específica” (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2017.)

Cardoso & Costa (2016) apresentaram alguns potenciais das novas tecnologias dentro da geotecnia, sendo a biotecnologia uma disciplina com impacto potencial elevado, trazendo diversas finalidades: melhor entendimento do comportamento dos materiais geológicos, novos materiais de construção, tratamento *in situ* de solos contaminados, possibilidade de técnicas passivas de estabilização de terrenos e ainda espera-se desenvolvimento de métodos mais eficazes para utilização de recursos. A partir do estudo da biotecnologia pode-se compreender que a sua interdisciplinaridade é capaz de promover um desenvolvimento tecnológico com aplicação em diversas áreas, inclusive na engenharia civil.

Uma aplicação é a biomineralização de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) com recurso à biotecnologia. A utilização dos processos biológicos nos solos pode ser uma prática útil e revolucionária na área da engenharia geotécnica (DEJONG et al., 2010).

### 4.2.1 Biomineralização

A biomineralização se baseia no uso de minerais no qual em contato com elementos vivos (fungos, bactérias, etc.), produzem reações no qual potencializam a vida em todas as dimensões (BIOROCHA AGRICULTURA E BIOMINERALIZAÇÃO, 2017).

A biomineralização trata-se de um processo comum na natureza, onde os organismos presentes no ambiente, por meio de reações químicas entre os compostos, formam precipitados mineirais, que é o resultado das atividades metabólicas de determinado organismo em certa condição. Diversas espécies de bactérias já foram estudadas sistematicamente, o que expandiu o conhecimento sobre os processos de biomineralização, incluindo a produção de carbonato de cálcio (AGÊNCIA DE COMERCIALIZAÇÃO DE TECNOLOGIA (ACT), 2017).

A biomineralização é o processo o qual organismos vivos sintetizam minerais inorgânicos. Um exemplo de biomineralização é a precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), no qual é induzida por atividades metabólicas de bactérias (REIS, 2017). A precipitação ocorre devido a capacidade dos microorganismos secretarem substâncias metabólicas, que reagem com íons de cálcio, resultando na precipitação de minerais (GONZÁLEZ, 2009).

#### 4.2.2 Biocimentação

A biocimentação é a precipitação de material nos espaços entre os vazios do solo, unindo as partículas entre si, após a inserção de microorganismos e aditivos específicos no solo (GARBIN, 2016). O princípio da técnica da biocimentação consiste na precipitação de carbonato de cálcio por entre os espaços vazios do solo (DEJONG et al. 2010), o que faz com que essa técnica também seja abordada como 'biomineralização' ou simplesmente 'precipitação de carbonato de cálcio no solo'

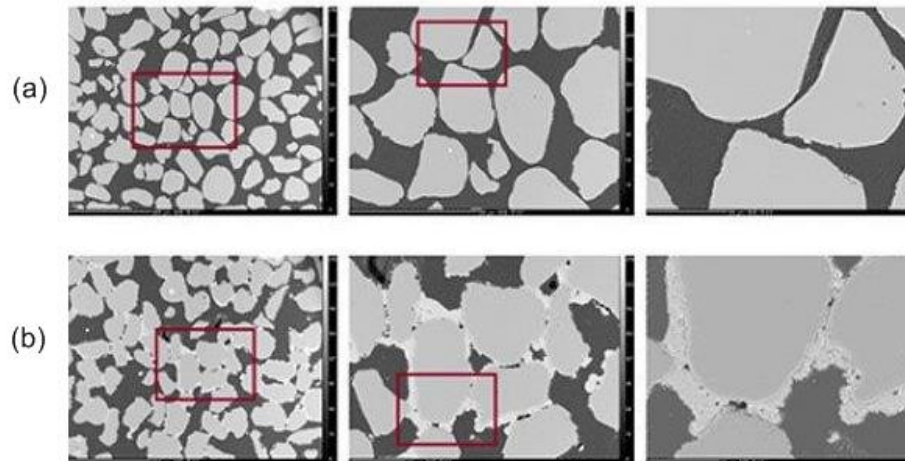
A técnica de precipitação de carbonato de cálcio em solos também pode ser denominada como biocimentação, uma vez que o carbonato de cálcio forma pontes de ligação entre as partículas de solo, proporcionando aumento de coesão do material. Essa tecnologia ainda é recente e vêm sendo estudada internacionalmente há pouco mais de 20 anos, onde aplicação prática mais comum tem sido no controle da erosão. No Brasil, a técnica ainda é pouco difundida e portanto há carência de estudos de bio cimentação. No entanto, a aplicabilidade da técnica pode se dar em diferentes áreas como no controle de processos erosivos, estabilização de solos e encapsulamento de contaminantes (GARBIN, 2016, p. 3).

A técnica de biocimentação consiste na inserção de bactérias no solo, juntamente com um meio nutriente, geralmente composto por ureia e cloreto de cálcio, onde tem-se uma reação química capaz de produzir calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) (PEDREIRA, 2014). Vários estudos têm utilizado diferentes tipos de substâncias para induzir a precipitação de  $\text{CaCO}_3$ , porém o cloreto de cálcio e ureia juntamente com nutrientes tem sido os mais usuais (REIS, 2017).

A calcite formada corresponde ao que se chama de biocimento e é responsável pela ligação das partículas do solo, a partir do preenchimento dos espaços vazios do solo, o que conseqüentemente traz um aumento da rigidez e resistência do solo (PEDREIRA, 2014).

A FIG.5 mostra o material precipitado entre os espaços vazios do solo.

Figura 5 – Biocimentação: a) solo sem tratamento; b) solo tratado por MICP.



Fonte: DEJONG et al, 2010, p. 44.

As áreas demarcadas em vermelho mostram os espaços vazios do solo preenchidos por ar (FIG. 5a) e, após o tratamento por biocimentação, os espaços vazios são preenchidos pela precipitação de carbonato de cálcio (FIG. 5b). A precipitação de calcita resulta na diminuição dos espaços de vazios no solo, aumentando a rigidez e a resistência dos solos (DEJONG et al., 2006). Vários estudos relatam a melhoria da resistência ao cisalhamento e também a redução da permeabilidade dos solos, através do tratamento com enzima urease (WHIFFIN et al., 2007).

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 (COSTA, 2016, p. 13).

De acordo com Pedreira (2014), a biocimentação, também conhecida como técnica MICP (*Microbiologically Induced Calcite Precipitation*), é um processo ecológico e natural, que consiste em melhorar aspectos de meios porosos, como o solo, utilizando bactérias, sendo a mais utilizada a *Bacillus pasteurii*. As bactérias são capazes de precipitar carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), propondo a união das

partículas do solo e a colmatagem do meio poroso, tornando o solo tratado menos permeável, mais rígido e mais resistente.

Os microorganismos devem receber nutrientes como alimento, além de estarem em condições favoráveis para a sua sobrevivência. A bactéria *Bacillus* é comum no solo, e pode precipitar carbonato de cálcio continuamente, em condições favoráveis (VERMA et al., 2015).

A MICP trata-se de uma técnica que tem surgido recentemente, e se constitui de uma alternativa para melhoramento das propriedades mecânicas de solos, assim como também de estruturas de argamassa e de concreto além de reparação de fissuras e na proteção das superfícies destes elementos em relação a ataque de agentes nocivos. As aplicações da técnica MICP são ilimitadas, porém são fundamentais a realização de mais estudos sobre a alternativa, visando aprofundar em cada aplicação e superar as limitações antes da sua comercialização em escala industrial (REIS, 2017).

Além da técnica MICP, no qual os microorganismos injetados geram a enzima urease, que catalisa a hidrólise da ureia e ocorre a precipitação do carbonato de cálcio, ainda é possível realizar a catálise através da adição da enzima urease derivada de plantas, como feijões, melão e abóbora. Essa técnica é chamada de Precipitação do Carbonato de Cálcio por Indução de Enzimas (EICP) e tem como vantagem a eliminação das complexidades do processo microbiológico como cultura e armazenamento de bactérias (COSTA, 2016).

#### **4.2.2.1 Processo químico e microbiológico**

São diversas as maneiras de induzir a precipitação de carbonato de cálcio em solos, como por exemplo a desnitrificação, redução de sulfato, indução da precipitação de dolomita e redução do ferro, porém, a mais eficiente de todos os processos é a hidrólise de uréia. Esse processo utiliza cloreto de cálcio, ureia e a enzima urease para induzir a precipitação de carbonato de cálcio, que tem a finalidade de preencher os espaços vazios do solo (DEJONG et al., 2010).

Ressaltando que “as enzimas são moléculas capazes de acelerar as reações químicas, sendo consideradas catalizadoras de reações” (CARDOSO; ANDREOTE, 2016, p. 63). Estudos referidos ao fracionamento físico do solo mostram a predominância da atividade de várias enzimas como catalase, desidrogenase,

urease e protease nos microporos estruturais do solo, mostrando que a atividade enzimática apresenta forte relação com o estado de agregação do solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016).

Há diversas bactérias com potencial de cimentação biológica, entretanto, a *Sporosarcina pasteurii* (também conhecida por *Bacillus pasteurii*) é a bactéria mais recorrente em estudos de biocimentação. A bactéria usa ureia como fonte de energia e produz amônia, a qual aumenta o pH no ambiente, causando a precipitação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (DEJONG et al., 2006).

As bactérias responsáveis pela produção de calcite são conhecidas pelo nome de *Sporosarcina pasteurii* ou por *Bacillus pasteurii*. Estas bactérias catalisam a reação da hidrólise da ureia pela sua capacidade em produzir a enzima urease e é graças a esta reação que se dá a formação de calcite. As bactérias *Bacillus pasteurii* não são patogênicas e apenas produzem eficientemente calcite se o ambiente onde vivem lhes garantir determinadas condições. (PEDREIRA, 2014, p. 5).

Segundo Atkins e Jones (2012), a reação da enzima urease, em solução com cloreto de cálcio e ureia produz a precipitação do carbonato de cálcio. O cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>) é a fonte de cálcio para o carbonato precipitado e a ureia (H<sub>2</sub>NCONH<sub>2</sub>) age como fonte de hidrogênio fornecendo a energia necessária para a hidrólise da urease.

De acordo com Pedreira (2014), primeiramente, tem-se a hidrólise da ureia mediada pela urease, como mostra a Equação 11:



Na primeira reação, a enzima urease catalisa a reação com a ureia e água, que produz amônio e íons carbonato. Após esse processo, os íons carbonato reagirão com os íons de cálcio procedentes do cloreto de cálcio, como mostra a Equação 12:



Ocorre o aumento do pH, que é devido ao Amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) liberado pela hidrólise da ureia, causando a precipitação da calcita. Ressalta-se que existem

diversos reagentes, sendo a ureia um dos mais abordados até então (DEJONG et al., 2010).

#### 4.2.2.2 Fatores que influenciam a atividade das bactérias

Existem alguns fatores que podem influenciar o comportamento das bactérias, como:

- . pH - É um dos atributos físico-químicos do solo mais mencionados por influenciar as diferentes comunidades microbianas presentes no solo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). A produção de  $\text{CO}_3^{2-}$  de bicarbonato em água ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ) depende do pH do ambiente. A precipitação de carbonato de cálcio ocorre facilmente em ambientes alcalinos abundantes em cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e íons de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (GONZALEZ et al., 2014). De acordo com Pedreira (2014), a maior parte dos solos brasileiro possuem pH ácido, e por isso é importante adicionar ao meio nutriente algo que permita a elevação do pH do solo, a fim de obter condições favoráveis para a sobrevivência das células. Acetato de cálcio pode ser uma boa solução.
- . Temperatura - Cada microorganismo tem um valor ideal de temperatura para seu desenvolvimento, sendo esse valor dependente do aporte enzimático apresentado pelo organismo (CARDOSO; ANDREOTE, 2016). As bactérias utilizadas no processo de biocimentação são capazes de sobreviver em temperatura ambiente, porém, é quando a temperatura atinge  $30^\circ$  que esses microorganismos conseguem o pico da sua atividade. (PEDREIRA, 2014).
- . Quantidade de reagentes e cloreto de cálcio - Essas concentrações são importantes para a precipitação. Baixas concentrações desses nutrientes resulta em uma maior eficiência comparado a altas concentrações (REIS, 2017). Isso acontece porque os sais de cálcio fazem com que a salinidade da solução aumente, o que inibe a atividade bacteriana e, logo, a produção de calcite (PEDREIRA, 2014). “Foi demonstrado que para uma menor concentração de reagentes existe uma distribuição mais homogênea de calcite nos contactos entre as partículas do solo” (PEDREIRA, 2014, p. 8).

- . Nutriente - É importante a injeção de nutrientes, pois nem sempre o solo possui nutrientes suficientes para que as bactérias tenham boas condições de proceder com sua função. São exemplos de nutrientes: fósforo (P), potássio (K), magnésio Mg, cálcio (Ca), ferro (Fe), etc (PEDREIRA, 2014). A população microbiana pode ser estimulada, aumentando o crescimento e quantidade da população, através da adição de substâncias específicas no solo (GARBIN, 2016).
- . Granulometria - As bactérias precisam conseguir se deslocar facilmente por entre os poros para garantir uma produção de calcite homogênea (PEDREIRA, 2014). González (2009) ressalta em seu estudo que um maior índice de vazior possibilita um maior enriquecimento em carboanto de cálcio.

#### **4.2.2.3 Vantagens da técnica de biocimentação**

Uma das principais vantagens do método é por se tratar de uma técnica natural, que aumenta a resistência e rigidez do solo sem trazer impactos negativos ao ambiente (DEJONG, 2010).

Outra vantagem refere-se a alteração da permeabilidade, os métodos tradicionais como cortinas de jet grouting criam uma barreira totalmente impermeável no solo, o que altera o escoamento da água. Já o método por biocimentação reduz a permeabilidade, porém com o controle das substâncias adicionadas e suas concentrações, a permeabilidade não reduz em sua totalidade, o que evita grandes alterações no ciclo natural da água (PEDREIRA, 2014).

De acordo com Cardoso & Costa (2016), as técnicas de biotecnologia não substituirão a totalidade das técnicas convencionais de melhoramento de solos. Contudo existem atributos potencialmente favoráveis como:

- . Trata-se de um processo natural;
- . Consomem menos energia;
- . Não afetam as estruturas, logo podem ser aplicadas sob e em torno dessas, para melhoramento da capacidade de carga do solo;



- . Pode ser uma técnica de fácil implementação, tem um custo competitivo e tem capacidade para ser adotada pela indústria e aceita pela sociedade.

#### **4.2.2.4 Possíveis aplicações geotécnicas da biocimentação**

De Jong (2010), relata a aplicação da técnica biocimentação em várias áreas da geotecnia como:

- . Segurança de barragens de terra – A utilização do processo de biocimentação a montante pode impedir a erosão por piping.
- . Prevenção da erosão – O tratamento pode aumentar a resistência às forças erosivas do fluxo da água.
- . Estabilização de encostas e taludes – Estabilidade adicional e evitar falhas;
- . Prevenção de liquefação – A biocimentação evita o efeito de liquefação do solo.
- . Túneis – Estabilização do solo antes de concluir o túnel, para evitar rompimentos;
- . Barreiras impermeáveis – barreiras para desviar o fluxo da água no solo.

As aplicações da biocimentação referem-se à área da geotecnia. A precipitação de calcite no interior dos solos o torna menos permeável e mais resistente, o que torna a técnica viável. Desta forma, a técnica pode ser aplicada para reforço de fundações, evitar erosão interna em barragens de terra e até mesmo em ocorrência de desastres naturais como enchentes (PAASSEN, 2011). A técnica ainda pode ser aplicada como solução complementar às outras técnicas já utilizadas na área da geotecnia (PEDREIRA, 2014).

##### **4.2.2.4.1 Influência em fundações**

A biocimentação, apesar de ser uma área de estudos recente, apresenta aplicabilidade favorável dentro da área da geotecnia, inclusive na prática de fundações.

Uma fundação é a parte de uma estrutura que transmite cargas diretamente ao solo subjacente. Quando a área de solo próximo à superfície for capaz de suportar adequadamente as cargas estruturais, é possível usar sapatas ou radier, conhecidos como fundações rasas. Caso o solo próximo à superfície for incapaz de suportar adequadamente as cargas estruturais, são usadas estacas, assim como outras formas de fundações profundas (CRAIG, 2012).

Uma fundação projetada de modo correto transfere a carga pelo solo sem sobrecarregá-lo. Uma sobrecarga excessiva pode resultar em recalque excessivo ou rupturas por cisalhamento no solo, danificando a estrutura. Desse modo, engenheiros geotécnicos e estruturais que projetam fundações devem avaliar a capacidade de carga dos solos (DAS, 2011, p. 529).

Craig (2012) mostra que uma opção ao uso de fundações profundas é o melhoramento das propriedades do solo próximo à superfície; assim, fundações rasas passam a ser uma possibilidade. O tratamento do solo por biocimentação poderá evitar a construção de fundações profundas, ou pelo menos reduzir a sua quantidade (PEDREIRA, 2014).

Hoje em dia existem diversas técnicas de tratamento, algumas delas tóxicas e poluentes como é o caso da injeção de cimento no terreno. A bio cimentação é um tratamento alternativo às usuais técnicas utilizadas e a sua principal vantagem é ser totalmente natural e não constituir nenhum risco de poluição para o ambiente (PEDREIRA, 2014, p. 17).

A precipitação de calcita resulta na diminuição dos espaços de vazios no solo, aumentando a rigidez e a resistência dos solos (DEJONG et al, 2006). Dejong (2010), visa aplicação na redução de assentamento em edifícios e aumento de capacidade de carga para fundações.

#### **4.2.2.4.2 Controle de processos erosivos**

A erosão do solo faz parte de um dos grandes problemas mundiais, devido ao grande potencial de destruição, colocando em risco a população e ameaçando áreas agrícolas e urbanas (GONZALEZ, 2009).

O tratamento de solo mole consiste em procedimentos eficazes com a finalidade de melhorar o solo em relação às suas propriedades geotécnicas, como suas características de resistência e deformabilidade (MASSAD, 2010). A biocimentação resulta em um aumento da propriedade de rigidez do solo, através da atividade microbiana. Sendo assim, pode ser aplicada para prevenir erosão de solo, amenizar o potencial de liquefação de areia e compactar solo em terrenos em recuperação (GARBIN, 2016).

Whiffin et al. (2007) afirma que, dentro do contexto geotécnico, o potencial de precipitação de calcita por meios biológicos é caracterizado como uma importante solução de adaptação das propriedades do solo para os fins desejados, que se trata de melhoramento da resistência do solo e diminuição do coeficiente de permeabilidade.

#### **4.2.2.4.3 Obras de terra**

De acordo com Massad (2010, p. 11), “uma obra de terra pode ser entendida como uma ‘estrutura’ construída com solo ou blocos de rocha, isto é, na qual o solo e a rocha são os materiais de construção.”

Barragens são estruturas construídas em vales, com a objetividade de fechá-los transversalmente para represar a água, e podem ter finalidades como abastecimento de cidade, suprimento à irrigação e produção de energia elétrica. Os diques são contridos ao longo dos cursos d’água com a finalidade de impedir seu transbordamento para os terrenos marginais abaixo (CAPUTO, 2008). Caputo (2008, p. 378) define talude como “quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha. Podem ser naturais, caso das encostas, ou artificiais, como os taludes de cortes e aterros”.

Geralmente, o tratamento das fundações de barragens de terra apoiadas sobre uma camada de solo permeável significa o controle da percolação da água (MASSAD, 2010). O arranjo da estrutura do solo interfere nas características de resistência mecânica e erodibilidade. Uma forma de controlar a água subterrânea de taludes ou de uma obra de terra de contenção é minimizando a quantidade de água que infiltra no topo e na face do talude, devido a fendas de tração abertas. O que recomenda-se preencher essa área com materiais porosos e selar o topo da fenda com materiais impermeáveis (NIEBLE; BLUCHER, 1984). A biocimentação é uma

opção de controle de permeabilidade da água, uma vez que o tratamento mostra redução do coeficiente de permeabilidade (PEDREIRA, 2014).

As barragens de aterro constituídas por apenas um tipo de solo, conhecidas por barragens homogêneas trazem consigo o objetivo de controlar a percolação que ocorre em seu interior (FIG. 6). Essa percolação pode submeter a barragem em risco, provocando erosão na área de jusante ou até mesmo influenciar em sua estabilidade (MASSAD, 2010).

Figura 6 - Barragem de terra homogênea.

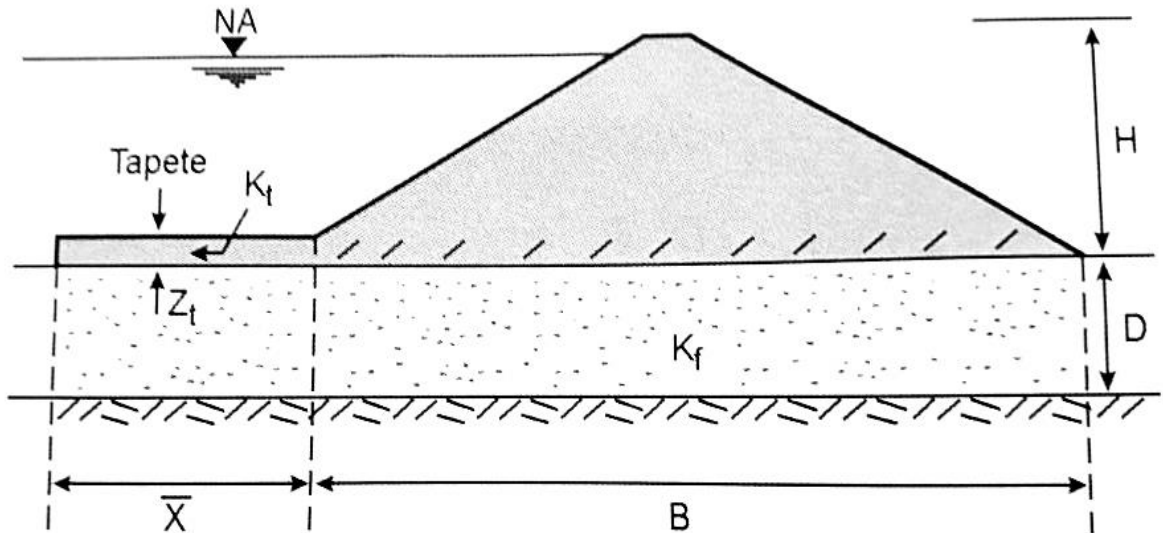


Fonte: CAPUTO, 2008, p. 460.

A bio cimentação pode ser uma solução viável para este tipo de problemas pois as bactérias introduzidas no solo podem produzir bio cimento que comalta os vazios gerados pela erosão. O carbonato de cálcio produzido pelas bactérias tem características de ligante, e vai unir as partículas do solo tornando o todo mais resistente e menos permeável. Assim é possível diminuir o processo de arrastamento de finos e impedir que ocorra o 'piping' que põe em causa a segurança da barragem e de tudo que a rodeia. Além disso, a técnica MICP também pode ser usada para selar zonas onde o piping começa a ocorrer (PEDREIRA, 2014, p. 22).

Massad (2010) afirma que em alguns casos, são utilizados tapetes "impermeáveis" (construídos de solo com característica de baixa permeabilidade), como um prolongamento da barragem de terra para montante, com o objetivo de aumentar e controlar todo o caminho de percolação da água (FIG. 7).

Figura 7 - Barragem de terra com tapete impermeável de montande.



Fonte: MASSAD, 2010, p. 203.

#### 4.2.2.4.4 Outras aplicações

Pode-se afirmar que a aplicação da biotecnologia à resolução de problemas envolvidos na área da geotecnia é um domínio muito promissor, e ainda há trabalhos de investigações a realizar e dificuldades a serem superadas (CARDOSO; COSTA, 2016).

As possíveis aplicações da técnica têm grande abrangência, sendo necessário o estudo e análises devidas, pois ainda se trata de uma técnica recente. DeJong et al. (2010) apresentaram em seus estudos uma relação qualitativa, classificando as diversas aplicações diferentes, considerando os critérios, como implementação, probabilidade de sucesso, custo e viabilidade e aceitação social, estes, são apresentados pela TAB. 4.

Tabela 4 - Avaliação qualitativa de aplicações alternativas da biotecnologia a problemas geotécnicos.

Aplicação	(A)	(B)	(C)	(D)	Classif. em 20
Reparação estrutural	5	5	3	5	18
Controlo da erosão	4	5	4	5	18
Coprecipitação/ imobilização de contaminantes	5	4	4	5	18
Controlo/mitigação de poeiras	4	5	4	5	18
Melhoramento de terreno em vias rurais	5	4	3	4	17
Captura superficial de CO <sub>2</sub>	5	3	4	5	17
Controlo de fugas	4	3	4	5	16
Reabilitação de monumentos antigos	3	3	5	5	16
Melhoramento de sub-bases de vias urbanas	5	3	3	4	15
Mitigação da liquefação de solos (MICP)	3	5	3	3	14
Melhoramento de depósitos de cinzas	1	4	4	5	14
Reciclagem / reutilização de materiais dragados	3	2	3	5	13
Mitigação da liquefação de solos (biogás)	3	3	3	3	12
Melhoramento da recuperação de petróleo dos reservatórios	1	3	3	5	12
Combate à desertificação	1	5	1	5	12
Enfraquecimento de sedimentos por fluidificação	3	2	3	3	11
Estruturas subterrâneas (condutas)	3	4	1	3	11
Estabilização de vias de escoamento (sinkholes)	1	3	2	5	11
Aterros como nova fonte de energia	3	4	1	2	10
Blocos de solo bio cimentado	2	4	1	3	10
Armazenamento de água	3	2	2	2	9

(A) Implementação: 1 a 5 (difícil a fácil)

(B) Probabilidade de sucesso: 1 a 5 (baixa a alta)

(C) Custo / viabilidade: 1 a 5 (caro a económico)

(D) Aceitação social: 1 a 5 (baixa a alta)

Fonte: CARDOSO; COSTA, (2016),p. 297, adaptado

## **5 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho foi constituída por revisão bibliográfica, em vários livros acadêmicos impressos, trabalhos acadêmicos publicados, e informações extraídas da internet.

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica, abordando a biocimentação e suas diretrizes. Posteriormente foi utilizado como dados investigados informações sobre ensaios laboratoriais de trabalhos acadêmicos já realizados sobre o contexto da biocimentação. Os ensaios laboratoriais e a discussão sobre estes foram base para pesquisa e investigação das influências do processo de biocimentação nas propriedades mecânicas dos solos.

Para executar a busca, utilizou-se as seguintes combinações de palavras chave: biocimentação, biomineralização dos solos, precipitação de carbonato de cálcio, bio estabilização dos solos e seus equivalentes em inglês, com estudos realizados do ano de 2008 a 2017.

Foi realizada pesquisa também em vários livros acadêmicos, sobre características do solo, o qual essas características sofrem influências sobre a técnica da biocimentação.

### **5.1 Dados investigativos**

Esse estudo foi baseado em inúmeros artigos e trabalhos, no qual descrevem seus métodos e resultados experimentais.

Considerando que a biocimentação é uma técnica recente e ainda há poucos estudos sobre o contexto, foram investigados trabalhos que consituíram-se de ensaios laboratoriais.

Dentro dos trabalhos abordados, cada um utilizou-se de determinadas substâncias e suas concentrações, visando abordar os diferentes procedimentos para se obter a biocimentação do solo.

Cada trabalho também empregou diferentes ensaios e métodos de análise do solo após o processo de biocimentação, com a finalidade de investigar as diferentes influências e características do solo biocimentado.

Em cada um dos estudos abordados foram investigadas determinadas propriedades do solo após a biocimentação, sendo as principais características mecânicas: estabilidade do solo e permeabilidade.

A constituição da solução cimentante, assim como os métodos de aplicação da técnica e os resultados foram retirados de quatro trabalhos principais:

- . Estudo A: Estudo de biocimentação em solo arenoso (GARBIN, 2016);
- . Estudo B: Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante par aestabilização do solo (COSTA, 2016);
- . Estudo C: Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos (GONZÁLEZ, 2009);
- . Estudo D: Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogrout experiment (PAASSEN et al., 2010).

Nos estudos abordados, o princípio é sempre o mesmo, induzir a precipitação do carbonato de cálcio, sendo que para cada estudo utilizou-se concentrações e substâncias específicas para o meio nutriente a ser aplicado ao solo. Os trabalhos abordados sobre o contexto da biocimentação serão apresentados nos tópicos seguintes.

#### **5.1.1 Estudo A: Estudo de biocimentação em solo arenoso (GARBIN, 2016)**

No estudo A, a técnica utilizada baseou-se na introdução periódica de solução cimentante, e não houve injeção de novas bactérias, ou seja, realizou-se a técnica a partir da ação das bactérias nativas do solo.

O objetivo do estudo foi analisar a capacidade das bactérias nativas do solo para a biocimentação, assim como avaliar o ganho de resistência à compressão simples das amostras de solo biocimentado e também analisar a estrutura do solo quanto à precipitação de carbonato de cálcio.

Utilizou-se solo arenoso, proveniente de jazidas da região de Osório-RS. Foram preparados quatro corpos de prova cilíndricos com diâmetro de base igual a 4,4 cm e altura de 9 cm.



As amostras foram moldadas no interior de provetas de 250mL, no qual apresentaram índice de vazios igual a 0,75 e umidade inicial de 10%.

Foram utilizadas três amostras (CP\_1, CP\_3, CP\_4) com areia de Osório retirada do campo experimental e a quarta amostra (CP\_controle), foi colocada em estufa à temperatura de 115 graus celsius, com o objetivo de esterelizar o espécime dos microorganismos existentes no material.

Foi empregado no estudo A, a técnica de percolação periódica de solução cimentante. Foi utilizado 100 mL de solução cimentante, o que equivale a 1,75 vezes o volume de vazios da amostra. A solução foi aplicada por força gravitacional em cada um dos corpos de prova, por 28 vezes, em intervalos de 24 horas entre as aplicações.

A solução cimentante foi constituída principalmente por uréia e cloreto de cálcio. A peptona e o extrato de levedura foram adicionados com o propósito de estimular o crescimento bacteriano e o bicarbonato de sódio e cloreto de amônio teve a função de estabilizar as reações. A TAB. 5 apresenta a composição da solução cimentante utilizada.

Tabela 5 - Composição da solução cimentante utilizada no tratamento do solo.

Regente	Concentração (g/L)
Peptona	2
Extrato de levedura	1
Cloreto de Amônio	10
Bicarbonato de Sódio	2,12
Ureia	30
Cloreto de Cálcio	56

Fonte: GARBIN, 2016.

Após os 28 dias de ensaio, foram analisados os resultados.

Os moldes dos corpos de prova continham um furo na base, o qual permitiu a drenagem e a coleta do efluente da solução aplicada.

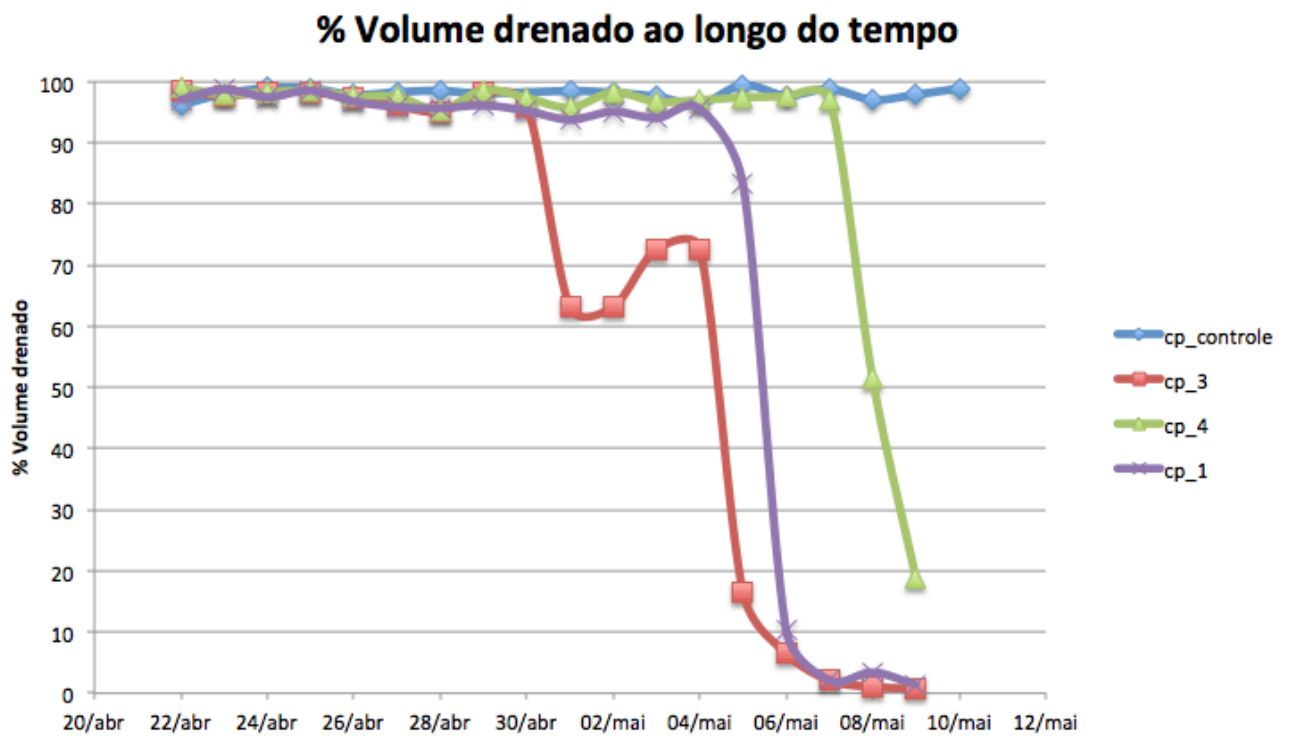
O volume drenado da solução efluente foi monitorado em intervalos médios de 24 horas, a partir da segunda semana da aplicação da técnica.

Observou-se que os três corpos de prova (cp\_1, cp\_3 e cp\_4) reduziram consideravelmente o volume de efluente percolado. Nos últimos dias de ensaio, apresentaram percolação de 1%, exceto o corpo de prova controle (cp\_controle).

A redução na drenagem da solução foi associada a diminuição da permeabilidade das amostras causada pela formação de cristais de carbonato de cálcio entre as partículas de solo.

A porcentagem de líquido drenado de acordo com os dias de ensaios é apresentada pelo gráfico da FIG. 8.

Figura 8 - Porcentagem de volume do efluente drenado por dia em ensaio.

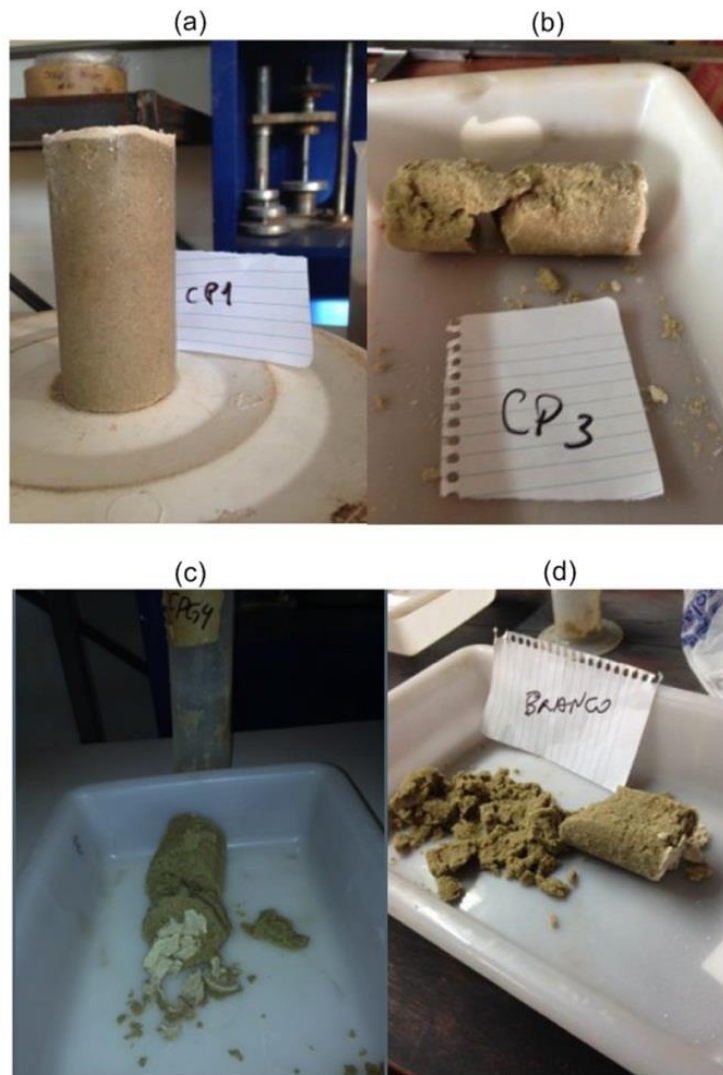


Fonte: GARBIN, 2016, p. 16.

A desmoldagem dos corpos de prova aconteceu após os 28 dias de ensaio. O corpo de prova CP\_1 foi o único a apresentar integridade total da estrutura e a amostra CP\_3 demonstrou boa cimentação visual da parte superior do corpo de prova. As amostras demonstraram boa cimentação em algumas áreas do corpo de prova enquanto em outras partes houve menos cimentação, o que demonstrou que não houve total homogeneidade de precipitação de carbonato de cálcio presentes nas amostras.

A FIG. 9 mostra os corpos de prova tratados pela técnica da biocimentação após a desmoldagem.

Figura 9 - Desmoldagem dos corpos de prova CP\_1 (a), CP\_3 (b), CP\_4 (c) e CP\_controle (d) ensaiados.



Fonte: GARBIN, 2016, p. 16.

Foi observado nas amostras desmoldadas a presença de uma camada de coloração clara na superfície do corpo de prova.

Foi realizado ensaio de compressão simples em prensa manual com o objetivo de avaliar a resistência da areia bio cimentada. Pelo fato de o corpo do prova CP\_1 ter sido o único a ser desmoldado com integridade estrutural, essa foi a única amostra rompida a compressão simples. O carregamento resistido pela amostra foi expresso como forma de tensão para a área da seção do corpo de

prova, sendo assim, a amostra resistiu a uma tensão de 194 kPa. A FIG. 10 mostra o plano de ruptura do corpo de prova CP\_1.

Figura 10 - Ruptura do corpo de prova CP\_1 após tratamento do solo.

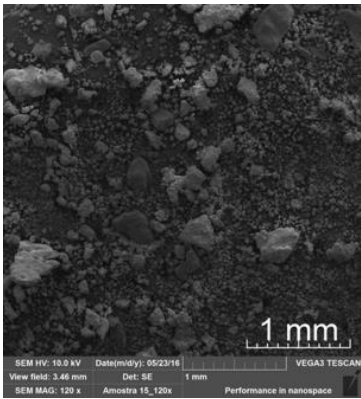
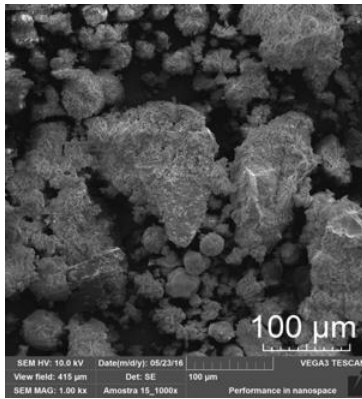
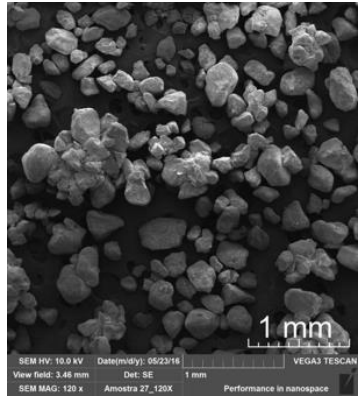
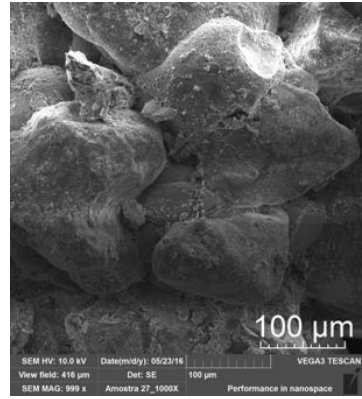
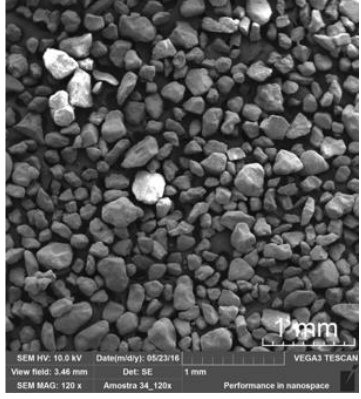
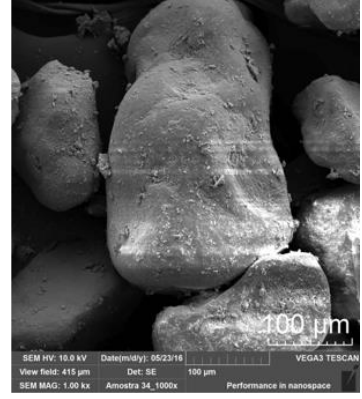
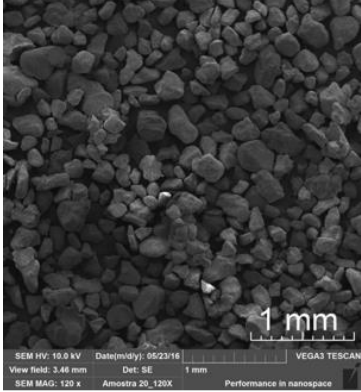
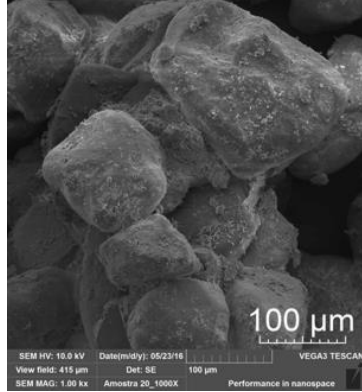


Fonte: GARBIN, 2016, p. 47.

Foi analisado a área de ruptura da amostra, que não ocorreu com integridade no corpo de prova, mas localizada na parte inferior da amostra. Esse motivo indicou que a cimentação não ocorreu de forma uniforme ao longo do corpo de prova. Ainda foi analisado que a parte superior da amostra tenha tido maior eficiência na precipitação de carbonato de cálcio do que a parte inferior.

Utilizou-se o equipamento de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de identificar a formação de carbonato de cálcio nas amostras do estudo. O equipamento permitiu a análise da morfologia estrutural das amostras através de imagens ampliadas em até 6000 vezes. Cada corpo de prova teve sua microestrutura avaliada através de imagens aproximadas 120x e 1000x pelo MEV, sendo 4 amostras selecionadas de cada corpo de prova: uma amostra da base, uma amostra do centro, uma do topo e outra da crosta. O QUADRO 1 mostra as imagens do MEV, retirada da crosta, do topo, do centro e da base da amostra CP\_controle.

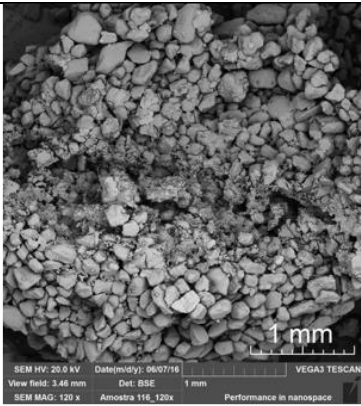
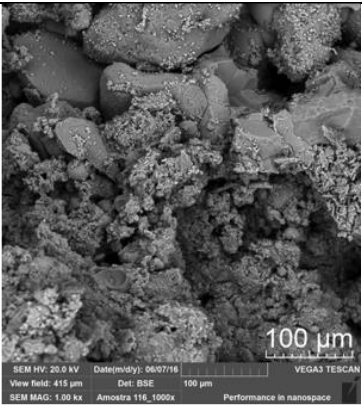
Quadro 1 – Imagens MEV da amostra CP\_controle por Garbin.

Amostra selecionada	CP_controle	
	Imagem MEV 120x	Imagem MEV 1000x
Amostra da crosta		
Amostra do topo		
Amostra do centro		
Amostra da base		

Fonte: GARBIN, 2016, adaptado.

A amostra de controle, apesar de ter sido previamente seca em estufa a fim de ser esterelizada, mostrou precipitação de carbonato de cálcio. Admitiu-se que possa ter tido a possibilidade da amostra ter sido contaminada pelos microorganismos em seu entorno, ou até mesmo que possa ter ocorrido a hidrólise de ureia por algum motivo que não seja a ação microbiológica. Para a amostra CP\_1 foi realizada análise apenas da parte do topo do corpo de prova. O QUADRO 2 mostra as imagens do MEV, retirada do topo da amostra CP\_1.

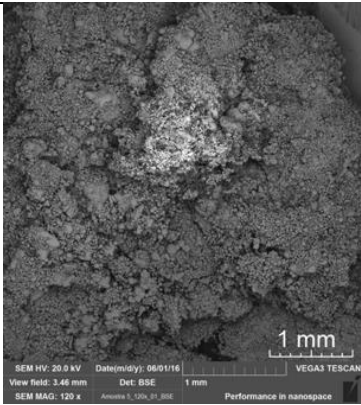
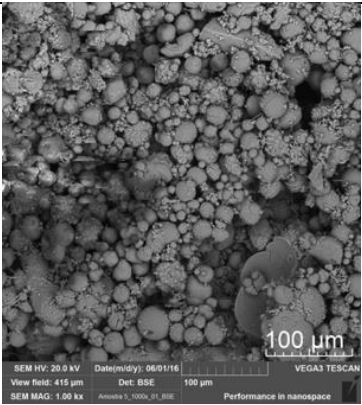
Quadro 2 – Imagens MEV da amostra CP\_1 por Garbin.

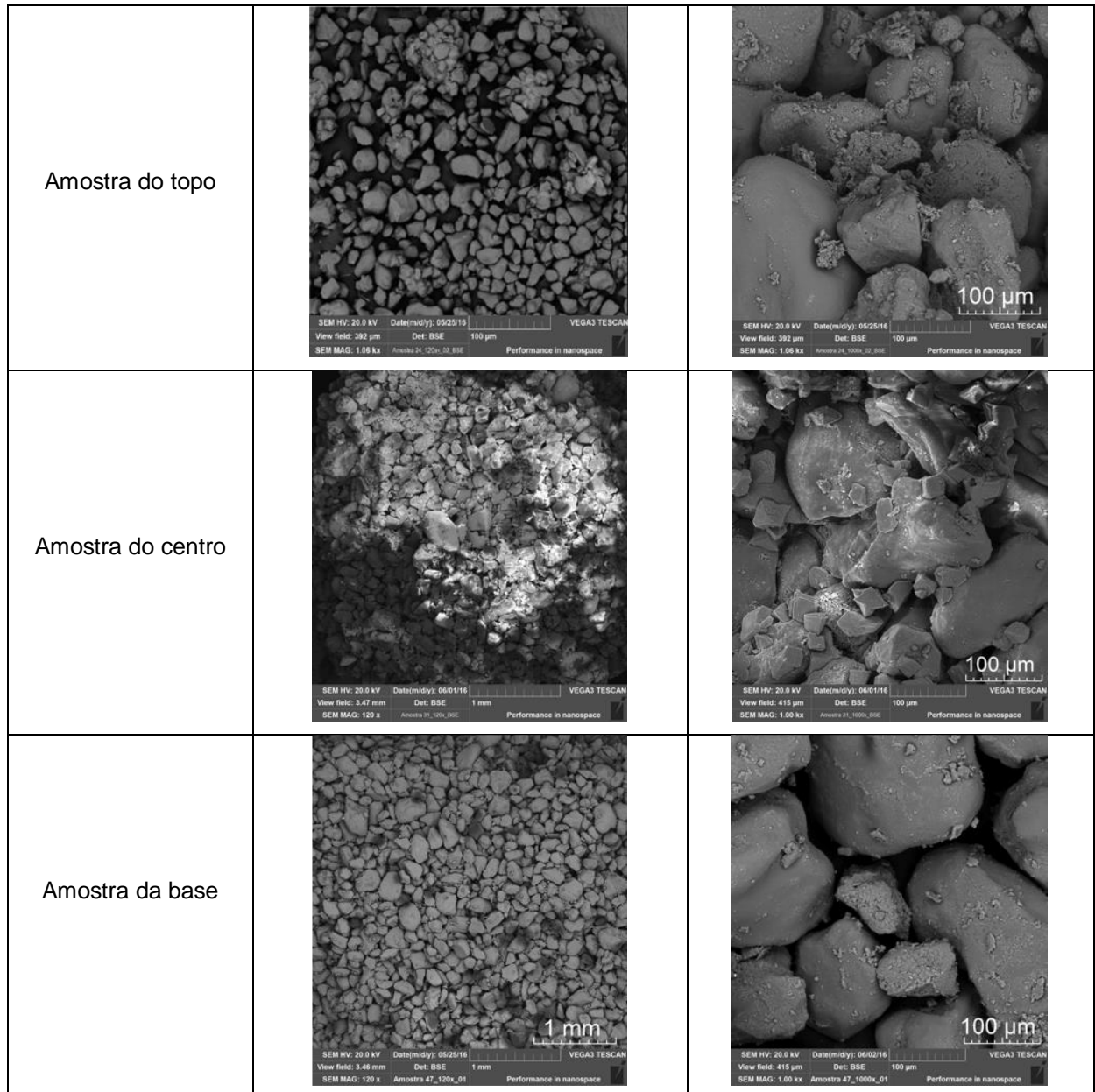
Amostra selecionada	CP_1	
	Imagem MEV 120x	Imagem MEV 1000x
Amostra do topo		

Fonte: GARBIN, 2016, adaptado.

Observou-se nítida presença de cristais de carbonato de cálcio ao redor das partículas da amostra CP\_1. O QUADRO 3 mostra as imagens do MEV, retirada da crosta, do topo, do centro e da base da amostra CP\_3.

Quadro 3 – Imagens MEV da amostra CP- 3 por Garbin.

Amostra selecionada	CP_3	
	Imagem MEV 120x	Imagem MEV 1000x
Amostra da crosta		



Fonte: GARBIN,2016, adaptado.

Nas imagens apresentadas, observou-se nítida presença de formação de cristais de carbonato de cálcio caracterizados pela geometria em paralelogramos, o que é atributo dos cristais de calcita. Na amostra da crosta analisou-se a presença de carbonato de cálcio no formato arredondado, o que pode representar morfologia característica de formações de valerite. O QUADRO 4 apresenta as imagens do MEV, retirada da crosta, do topo, do centro e da base da amostra CP\_4.

Quadro 4 – Imagens MEV da amostra CP\_4.

Amostra selecionada	CP_4	
	Imagem MEV 120x	Imagem MEV 1000x
Amostra da crosta		
Amostra do topo		
Amostra do centro		
Amostra da base		

Fonte: GARBIN, 2016, adaptado.



Considerou-se por fim que os microorganismos nativos do solo utilizados no estudo demonstraram-se eficientes para a técnica de biocimentação.

### **5.1.2 Estudo B: Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante par aestabilização do solo (COSTA, 2016)**

No estudo B, realizado por Costa (2016), o objetivo foi fundamentar como método eficaz para a estabilização do solo a utilização da enzima urease derivada de produto agrícola, na precipitação de carbonato de cálcio. No estudo, foi utilizado outras substâncias com a finalidade do melhoramento das propriedades mecânicas do solo, como a goma guar e a bentonita sódica.

A goma guar é um estabilizante e espessante utilizado na indústria alimentícia e retirada do endosperma do feijão do tipo guar. Possui como propriedade a capacidade de se hidratar em água fria e atingir alta viscosidade, se dissolvendo, além de ser instável a pH muito baixo (EDITORA INSUMOS, 2017).

A bentonita sódica é originada da alteração de cinzas vulcânicas depositadas sobre lagos e rios e, posteriormente cobertas por outros sedimentos. É uma argila plástica com predomínio de sódio. Possui uma principal característica de alto poder de absorção de água, o que leva a capacidade de trabalhar como impermeabilizante (SHUMACKER INSUMOS, 2017).

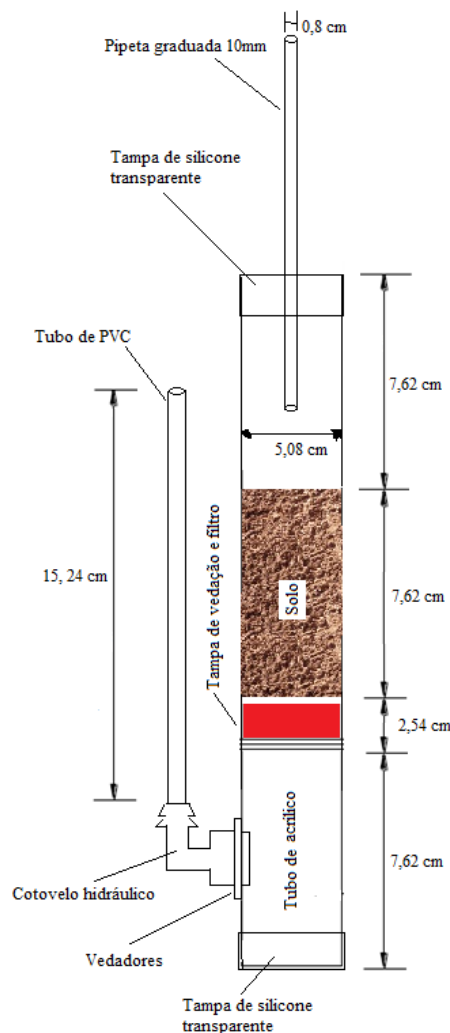
O solo utilizado no experimento foi um solo típico do estado do Arizona, classificado como areia bem graduada com silte. As quantidades das substâncias químicas utilizadas foram baseadas de acordo com estudos anteriores e calculadas de acordo com a quantidade da solução, de 800 ml. As substâncias utilizadas foram:

- . Enzima urease - Derivada da planta leguminosa *Canavalia ensiformis*, um tipo de feijão conhecido por feijão de porco. Foi adicionado um valor de 0,32 g de urease;
- . Goma guar e bentonita sódica – Foi adicionado a mesma quantidade calculada para a enzima urease, 0,32 g, o objetivo foi analisar se a adição dessas substâncias aumentaria o potencial da enzima urease;
- . Ureia – Foi adicionado 77 g de ureia como reagente da reação de precipitação de carbonato de cálcio;

- Cloreto de cálcio – Foi utilizado 94,08 g de  $\text{CaCl}_2$ , também como reagente da reação;
- Hidróxido de sódio (NaOH) – Com a finalidade de ajustar o pH. A faixa de pH desejada era de 7,5 e 9,5, pois se trata de um intervalo mais susceptível de precipitação do carbonato de cálcio. O pH final das soluções, verificado por pHmetro digital foi 8 e 8,8.

No experimento realizado por Costa (2016), foram produzidas dezoito colunas de acrílico, como o propósito de realizar ensaios para verificar o coeficiente de permeabilidade, como mostra a FIG. 11.

Figura 11 - Desenho esquemático da coluna utilizada para o experimento de Costa (2016).



Foram dezoito colunas preenchidas, intercalando para a mistura de carbonato de cálcio precipitado (EICP) com ou sem a goma guar e a bentonita, além de serem mantidas à temperatura de 24 °C ou 45 °C. A TAB. 6 mostra o modo no qual as colunas foram preenchidas.

Tabela 6 - 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: COSTA ,2016, p. 22.

Foram utilizadas três colunas como controle, ou seja, não foi adicionado nenhuma substância ao solo e foram mantidas à temperatura ambiente. Todas as colunas preenchidas foram testadas em condições estáticas, com o propósito de reproduzir em menor escala uma situação real.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade utilizou-se a Lei de Darcy. Os ensaios foram realizados utilizando os cálculos para o ensaio de carga variável. O monitoramento das colunas foi realizado ao longo dos meses de maio, junho e julho de 2015, durante treze semanas, no qual o teste de permeabilidade foi realizado toda quinta-feira. Para cálculo dos valores de permeabilidade foram obtidas as medidas de área da seção transversal da coluna (a), comprimento da

amostra do solo (L), área da seção transversal da amostra do solo (A) além do valor da altura inicial da coluna d'água no piezômetro ( $h_1$ ), de acordo com a TAB. 7.

Tabela 7 - Valores utilizados para os cálculos dos coeficientes de permeabilidade de acordo com os provetes.

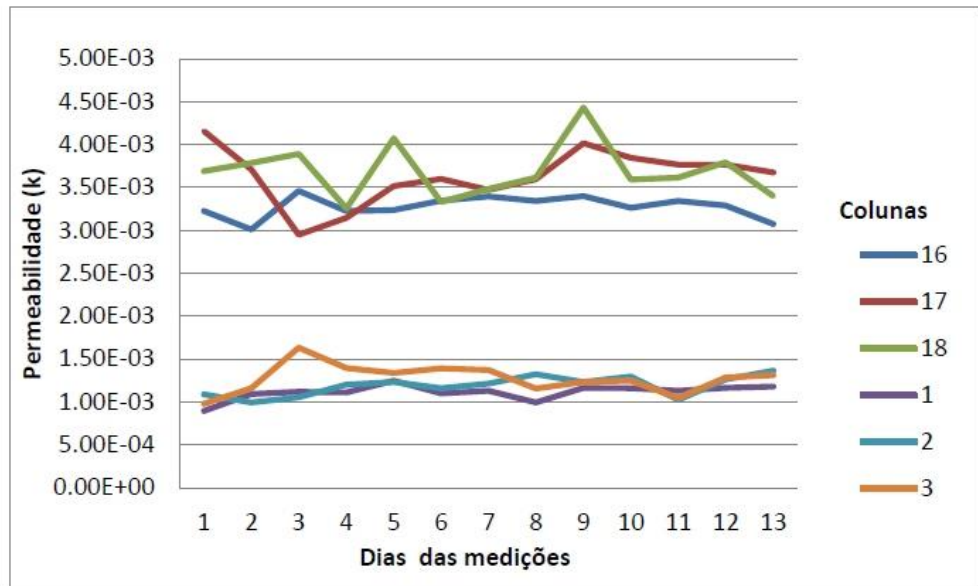
Coluna	a (cm <sup>2</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	L (cm)	$h_1$
1	0,5	20,27	5,25	10,5
2	0,5	20,27	5,65	10,5
3	0,5	20,27	5,26	9
4	0,5	20,27	5,55	10
5	0,5	20,27	5,75	9,5
6	0,5	20,27	5,65	8,5
7	0,5	20,27	5,75	10,5
8	0,5	20,27	5,75	10
9	0,5	20,27	5,75	10,3
10	0,5	20,27	5,75	9,9
11	0,5	20,27	8,75	14
12	0,5	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

Fonte: COSTA, 2016, p. 27.

Foi medido o tempo gasto a partir da altura fixada da coluna d'água no piezômetro até que a água atingisse determinada altura final. Foi tabelado todos os valores para o cálculo dos coeficientes de permeabilidade.

Diante dos valores de permeabilidade, constatou-se uma diminuição da permeabilidade no solo com a técnica da precipitação do carbonato de cálcio aplicada em comparação ao solo das amostras controle, como mostra o gráfico da FIG. 12. Por esse motivo, ficou-se comprovado que a técnica usando a enzima urease como agente para a precipitação do carbonato de cálcio reduz a permeabilidade do solo.

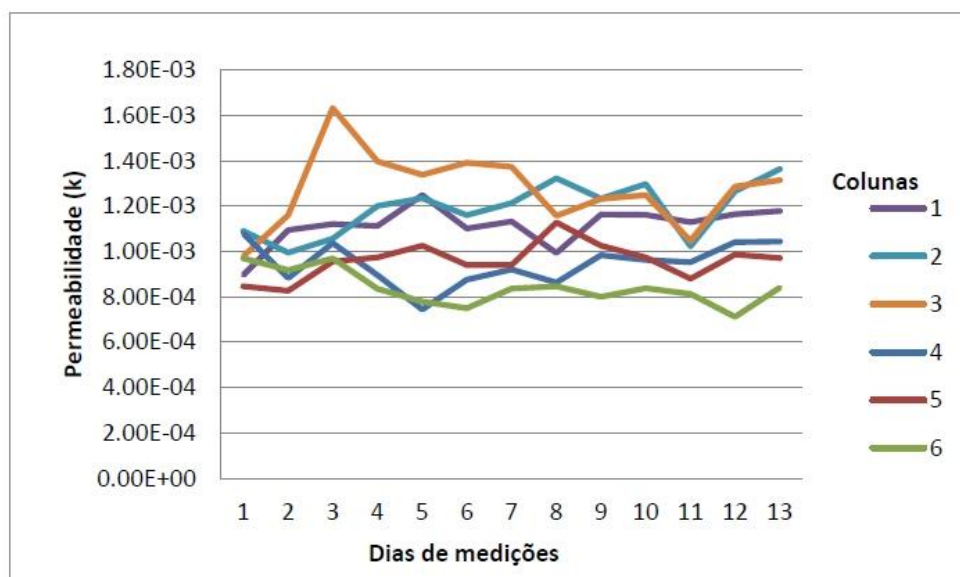
Figura 12- Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas de controle (16, 17 e 18) e as colunas contendo solo com carbonato de cálcio precipitado (1, 2 e 3).



Fonte: COSTA, 2016, p. 30.

As colunas que continham carbonato de cálcio precipitado, foram comparadas em relação a dois cenários de temperatura. Observou-se que as colunas que foram influenciadas pela temperatura mais alta ( $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) apresentaram valores mais baixos de permeabilidade, como mostra a FIG. 13. O que pode sugerir que a técnica pode obter melhores resultados em lugares com climas mais quentes.

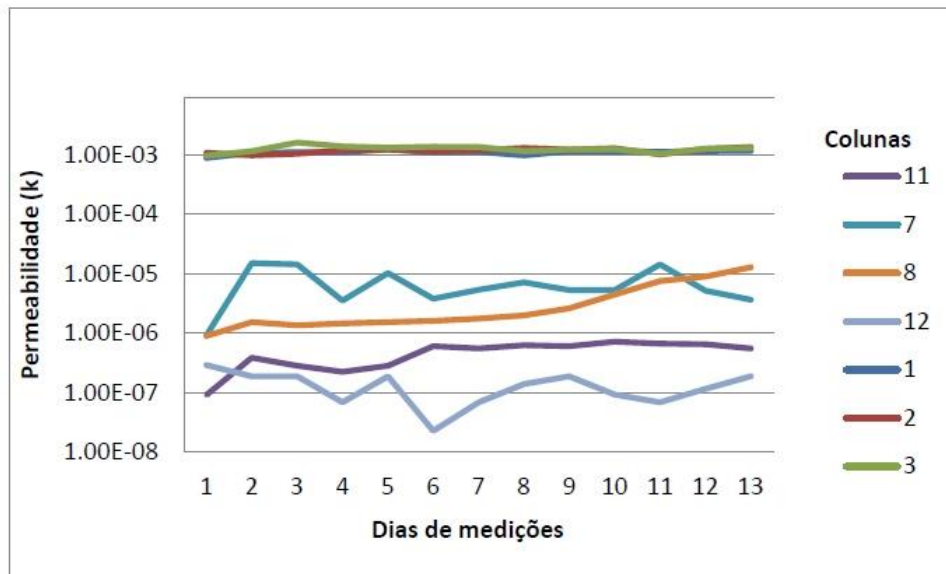
Figura 13 - Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetidos à técnica EICP com diferença de temperatura:  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  (1, 2 e 3) e  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  (4, 5 e 6).



Fonte: COSTA, 2016, p. 31.

A permeabilidade do solo diminuiu na adição de goma guar com solo submetido à precipitação do carbonato e também na adição de bentonita às duas substâncias anteriores. Dentre as substâncias adicionadas ao solo juntamente com a precipitação de carbonato de cálcio no experimento, a que mais obteve diminuição da permeabilidade foi a goma guar, como mostra FIG. 14.

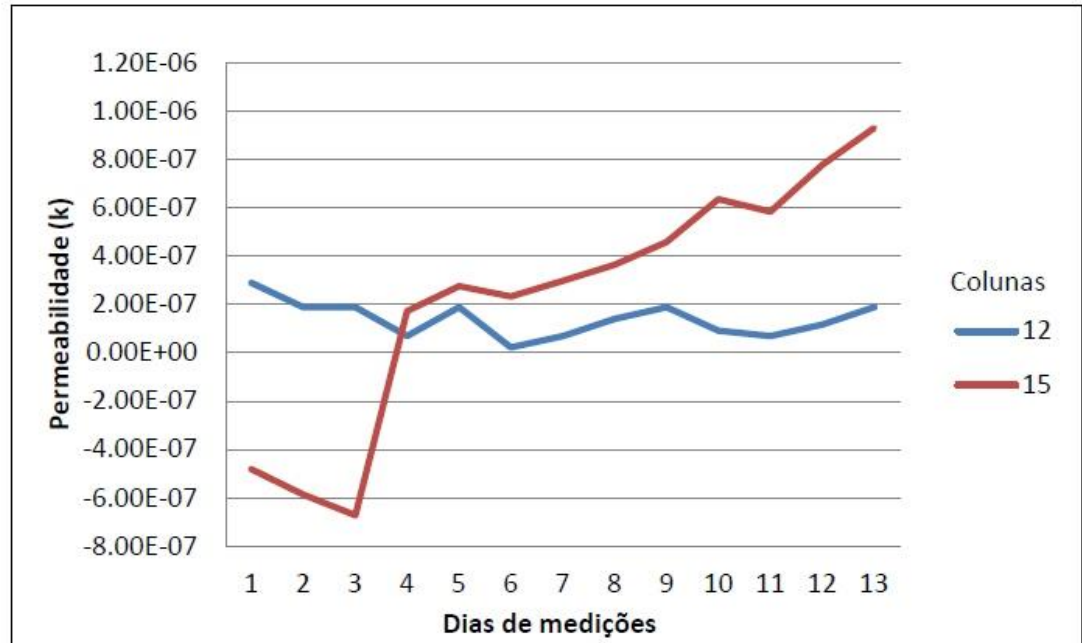
Figura 14 - Comparativo dos valores de permeabilidade obtidos entre as colunas contendo solo submetido à precipitação do carbonato de cálcio (1, 2 e 3), carbonato de cálcio e bentonita (7, 8), carbonato de cálcio e goma guar (11) carbonato de cálcio, bentonita e goma guar (12).



Fonte: COSTA ,2016, p. 35.

Foi considerado como insuficiente a experiência de misturar bentonita sódica e goma guar ao solo (coluna 15) pois, apesar de manter o coeficiente de permeabilidade baixo, ocorreu um comportamento inesperado nas três primeiras medições do estudo, onde a água foi ejetada do piezômetro, o que significa que a técnica manteve o solo altamente impermeável, não permitindo de alguma maneira a penetração da água. Mas, ao solo em que foi adicionado carbonato precipitado, bentonita e goma gar, o resultado foi uma baixa permeabilidade, porém o solo não se apresentou impermeável como na amostra da coluna 15. O que demonstrou benefício da técnica de precipitação de carbonato de cálcio no solo (FIG. 15).

Figura 15 - 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: COSTA, 2016, p. 37.

Baseado nos resultados obtidos, foi confirmado a redução da permeabilidade do solo na utilização das substâncias utilizadas, inclusive a técnica de precipitação de carbonato de cálcio no solo através da enzima urease de fonte agrícola apresentou diminuição na permeabilidade do solo.

### 5.1.3 Estudo C: Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos (GONZÁLEZ, 2009)

No Estudo C (González, 2009), o objetivo foi mitigar os processos erosivos por meio de biomineralização. A amostra de solo selecionado foi a 20 metros da margem de um local afetado por processos erosivos, localizado na cidade de Santa Maria – DF. O solo foi selecionado na localidade da voçoroca de Santa Maria, um local onde ser presente em constante processo erosivo. Foram cinco perfis de trabalho, dividido em cinco níveis de solo: de 0 a 1,5m, de 1,5m a 2,5m, de 2,5m a 3,5m, de 3,5m a 4,5m e de 4,5m a 6,0m. Foram dois blocos de solo de dimensão 0,30m x 0,30m x 0,30m.

Em uma primeira fase, o estudo consistiu na identificação das bactérias presentes nos solos e a preparação dos meios precipitadores. A determinação das bactérias presentes no solo foi feita a partir de ensaios bioquímicos.

Foi realizado no estudo a identificação da melhor combinação de nutriente para induzir a precipitação do carbonato de cálcio. Foram combinados dois tipos de meio nutrientes, todos baseados em estudos anteriores, onde cada um dos meios foram colocados em placas petri e após 24 horas, com a repicagem das bactérias, foram incubados os meios nutrientes na estufa a 25 °C, observados por 15 dias. As placas dos meios nutrientes foram analisadas através do microscópio petrográfico e conferidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). O nutriente denominado B4 foi o que mais demonstrou precipitados. Os componentes do meio são: 15 g de acetato de cálcio, 4 g de extrato de levedura, 5 g de glicose e 12 g de ágar, para 1 litro de água destilada. Após a determinação do melhor meio nutriente para a indução da precipitação do carbonato de cálcio, este foi adicionado aos blocos de solo. As amostras de solos foram colocadas dentro de um recipiente e foram feitos buracos na superfície do solo de aproximadamente 0,4 cm de diâmetro e 2 cm de profundidade, com distância de 10 cm entre si. O meio nutriente foi introduzido nos furos com a ajuda de uma seringa (FIG. 16).

Figura 7 - Introdução do nutriente B4 na amostra do solo para ensaio.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 62.



Optou-se de forma aleatória por preencher com o nutriente 60% dos vazios de cada solo. As amostras foram colocadas dentro da câmara úmida com temperatura de aproximadamente 25 °C e umidade relativa do ar de 60%. Os valores escolhidos foram de acordo com as condições médias do local selecionado, no caso corresponde à voçoroca de Santa Maria.

Tanto as amostras de solo natural, quanto as amostras tratadas, foram caracterizadas física, química, mineralógica e mecanicamente.

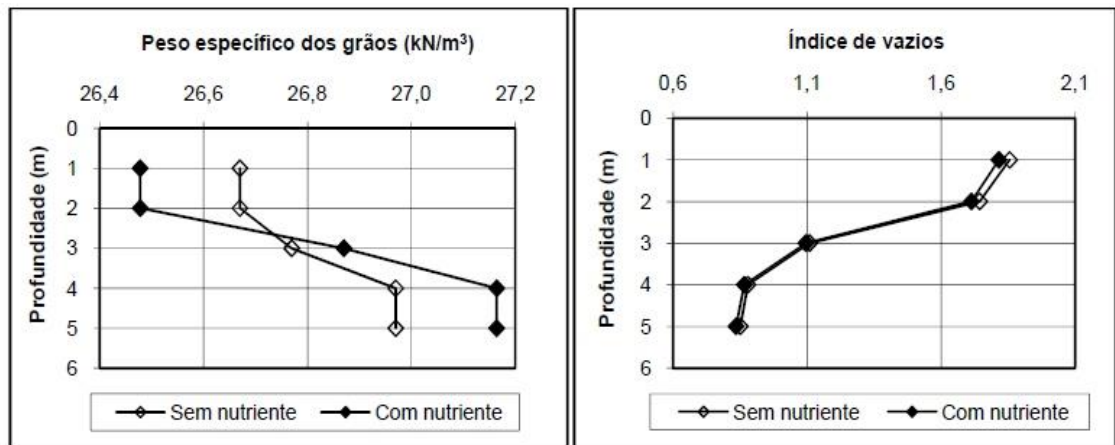
Para a caracterização física das amostras, foram realizados ensaios de determinação de umidade, peso específico dos grãos, limites de Atterberg, Miniatura Compactada Tropical (MCT) e granulometria.

A determinação do peso específico foi realizada de acordo com a Norma Brasileira NBR 6508/84. O valor foi útil para a determinação a fração fina e o índice de vazios das amostras.

Na caracterização da granulometria das amostras, foi utilizado o método de peneiramento e ensaio de sedimentação, além da determinação por meio do granulômetro a laser. A partir das amostras ensaiadas determinou-se os índices físicos do solo, natural e com a adição do nutriente.

O método da estufa foi utilizado para a determinação da umidade natural das amostras, baseado na Norma Brasileira NBR 6457/86. A FIG. 17 apresenta os resultados dos índices físicos naturais, do solo natural e do solo tratado com o meio nutriente.

Figura 17 - Variação em profundidade dos índices físicos do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria sem adição e com a adição do nutriente B4.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 97.

Foi observado uma pequena redução do índice de vazios ao acrescentar o nutriente, principalmente nos níveis superiores (1 m e 2 m). Foi constatado que esse comportamento se deu pelo fato do índice de vazios inicial ser maior nessas profundidades, o que fez com que acontecesse maior formação de carbonato de cálcio. Apesar do peso específico do solo ter sofrido poucas variações, considerou-se no estudo a possibilidade do nível diferenciado de hidratação do carbonato ter causado interferência nos valores obtidos.

O limite de liquidez foi determinado pela Norma Brasileira NBR 6459/84 e o limite de plasticidade pela Norma Brasileira NBR 7180/84. O índice de plasticidade é baseado na diferença entre estes dois limites. Esses resultados permitiram a classificação dos solos finos pelo sistema SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos) e também pela classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical). Os resultados relacionados à classificação dos solos denotaram uma mudança na adição do nutriente apenas nas duas camadas superiores (1 m e 2 m) (TAB. 8).

Tabela 8 - Classificação pelo SUCS e pelo MCT para cada camada do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria com e sem nutriente.

Profundidade (m)	Grupo MCT	Grupo MCT	Grupo S.U.C.S	Grupo S.U.C.S
	Sem nutriente	Com nutriente	Sem nutriente	Com nutriente
1	LG'	LA'-LG'	MH	ML
2	LG'	LA'-LG'	MH	ML
3	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML
4	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML
5	LA'-LG'	LA'-LG'	ML	ML

LG': argilas e argilas arenosas de comportamento laterítico;  
 LA': Solos tipicamente arenosos de comportamento laterítico;  
 MH: Silte de alta plasticidade;  
 ML: Silte de baixa plasticidade.

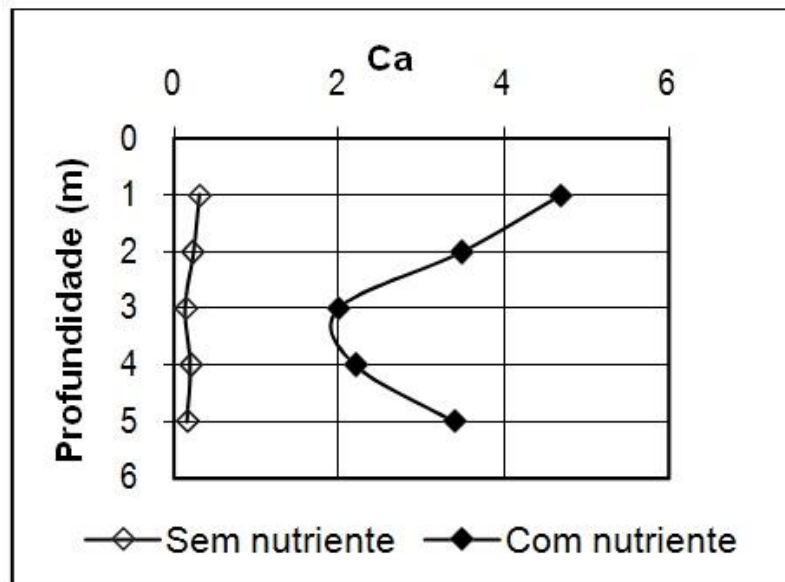
Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 113.

Foi indicado que o solo, nas camadas superiores após o tratamento, conduziu sua classificação no sistema MCT à fronteira da areia. Na classificação SUCS, o solo passou a ser classificado como de baixa plasticidade, também nas camadas superiores. Ainda foi relatado no estudo, que o fato das camadas inferiores não

terem sofrido alterações na classificação do solo, não significa obrigatoriamente que não houve influência do tratamento no comportamento do solo, mas sim a pouca sensibilidade dos métodos para analisar as alterações ocorridas.

Na caracterização química do perfil, foram realizados ensaios que consistiram em medidas de pH, determinação dos teores de cálcio, sódio, potássio, magnésio, fósforo, entre outros. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas da EMBRAPA (1997). A FIG. 18 mostra o aumento de cálcio na amostra de solo com nutriente.

Figura 18 - Resultado da análise da geração de carbonato de cálcio (Ca) nas amostras do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutriente.



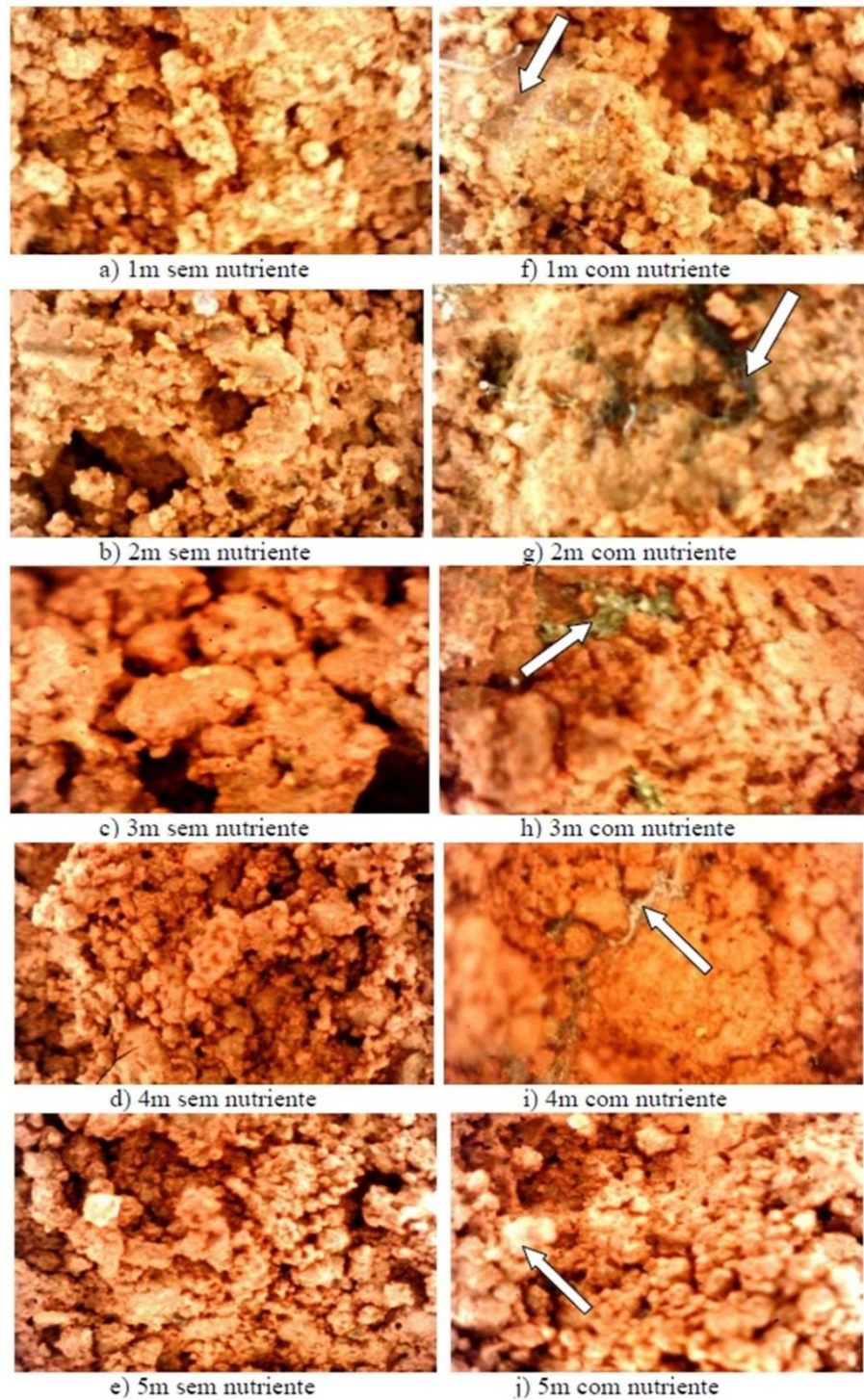
Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 116.

Foi percebido evidente aumento de carbonato de cálcio na amostra com nutriente, o que revelou a eficiência do método em estudo para a precipitação de carbonato de cálcio. As profundidades superiores da amostra com nutriente mostraram maior presença de precipitados, o que foi questionado se houve correlação com o índice de vazios, que também era maior nessa profundidade. Foi ressaltado no estudo que é necessário espaços vazios para que a reação de precipitação ocorra.

A caracterização estrutural das amostras de solo natural e amostras de solo com nutriente foi realizada a partir de imagens obtidas por meio de uma lupa eletrônica natural de alta resolução, que permite imagens com aumentos de 50 até

400 vezes, e complementada no microscópio eletrônico de varredura. A FIG. 19 apresenta as imagens obtidas.

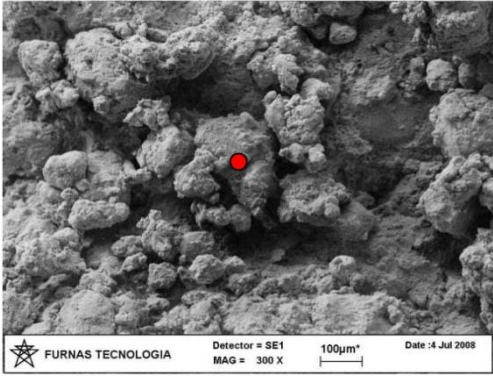
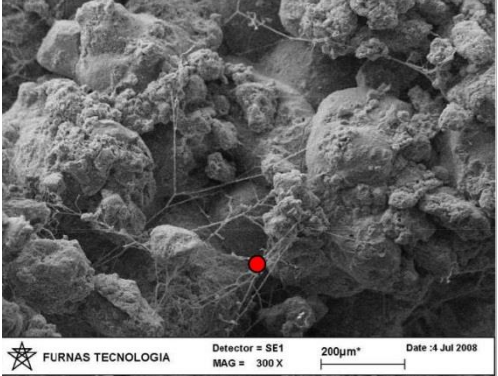
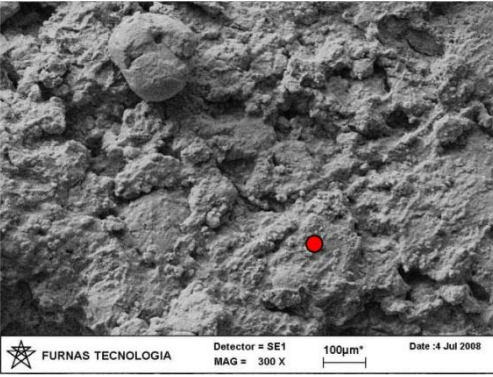
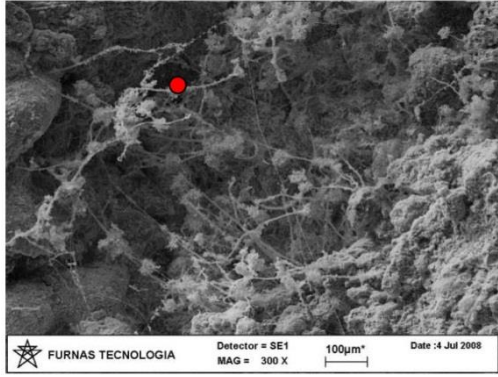
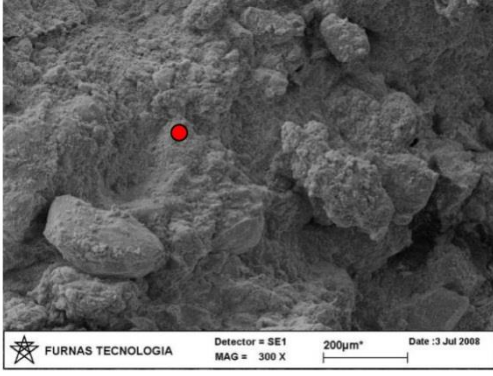
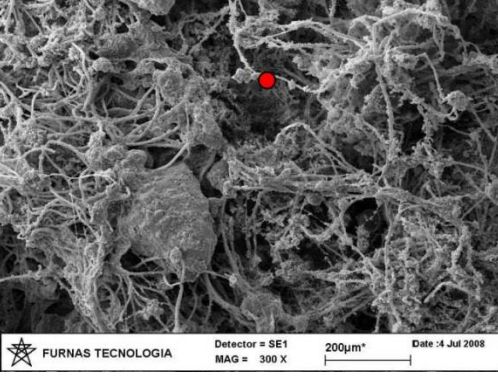
Figura 19 - Imagens na lupa de alta resolução com luz natural da estrutura das camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, sem nutriente e com nutriente, aumentos de 100 vezes.

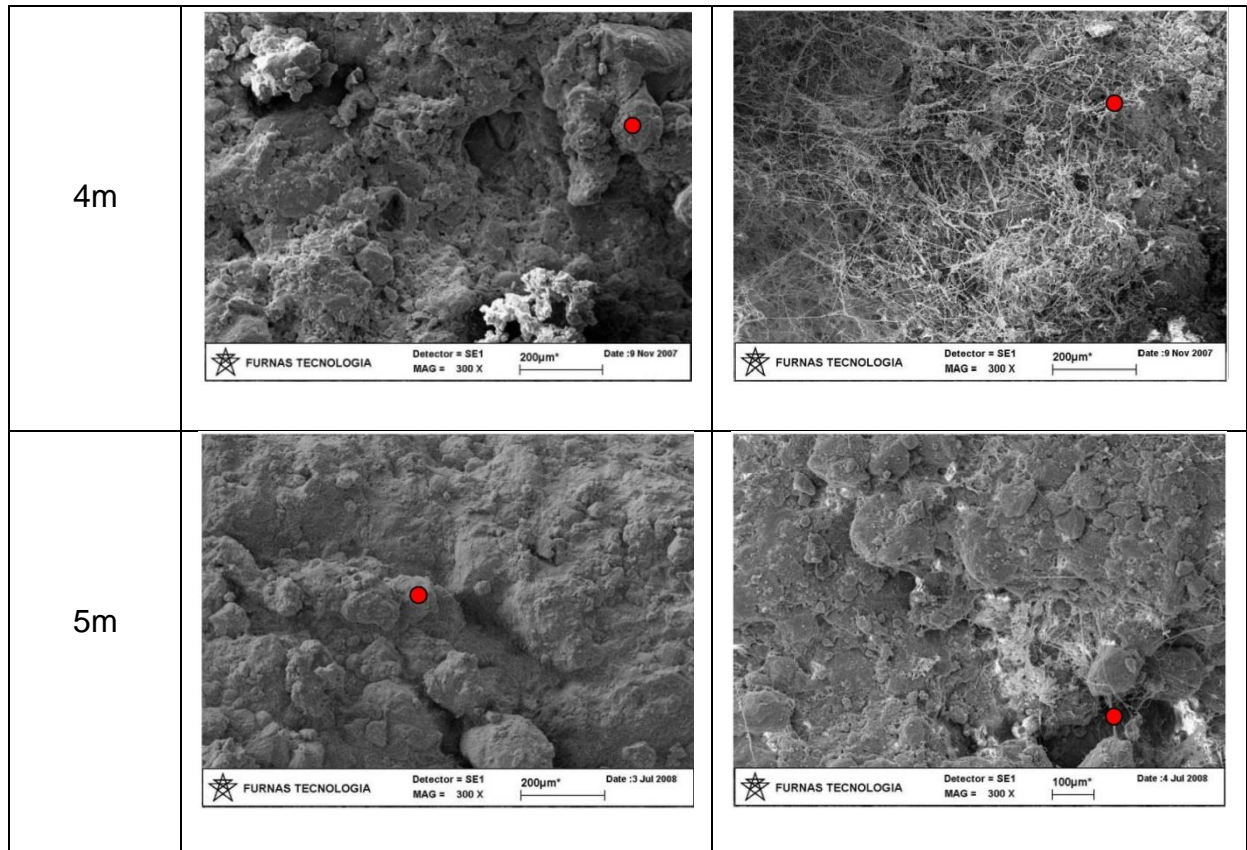


Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 128.

Nas amostras sem nutrientes foi observado que os solos passaram a apresentar uma estrutura mais aberta a medida que a profundidade diminuía. No estudo, foi mostrado que esse foi o motivo dos solos tratados com nutrientes terem precipitações de carbonato de cálcio mais evidenciadas nas camadas superficiais. Logo, constatou a porosidade do solo relevante para o tratamento. O Quadro 5 mostra as imagens das amostras de solo no MEV em 300 aumentos.

Quadro 58 - Imagens no MEV das diferentes camadas do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutrientes, com aumento de 300 vezes.

Profundidade	Solo sem nutriente	Solo com nutriente
1m		
2m		
3m		

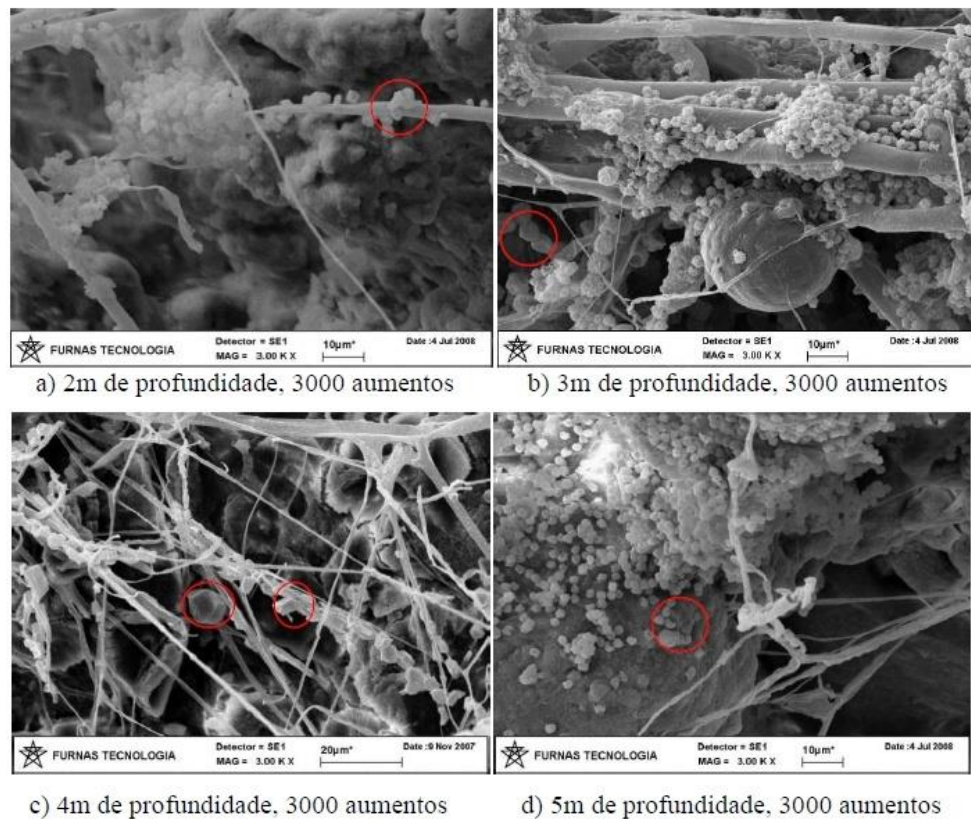


Fonte: GONZÁLEZ, 2009.

Em todas as profundidades do solo com nutriente foram observadas a presença de precipitação de carbonato de cálcio entre os grãos de solo. Os precipitados apareceram em forma de fibras ou glóbulos, unindo ou preenchendo os espaços vazios entre os grãos do solo. Todas as fibras analisadas foram identificadas contendo cálcio. No estudo, foi analisado a comparação das imagens MEV entre a amostra sem nutriente e a amostra com nutriente, onde ficou evidente a formação de precipitados de carbonato de cálcio.

Nas imagens do MEV com aumento de 3000 vezes, percebeu-se com notoriedade a presença e abundância de precipitados de carbonato de cálcio entre os poros do solo. Estes também se apresentaram tanto em forma de fibras quanto em forma de glóbulos. A FIG. 20 mostra imagens do MEV com aumento de 3000 vezes das diferentes profundidades do perfil de solo tratado com nutriente.

Figura 20 - Imagens no MEV para quatro profundidades das amostras do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria com nutriente.



Fonte: GONZÁLEZ ,2009, p. 134.

A caracterização mecânica do perfil foi determinada a partir de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, resistência ao cisalhamento direto, entre outros como permeabilidade e desagregação.

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados de acordo com a Norma NBR12770 (ABNT 1992), a uma velocidade de 0,04572mm/min. Foi realizado no mínimo três ensaios para cada amostra de solo, com nutriente e sem nutriente (FIG. 21). Posteriormente foi determinado a umidade de cada amostra.

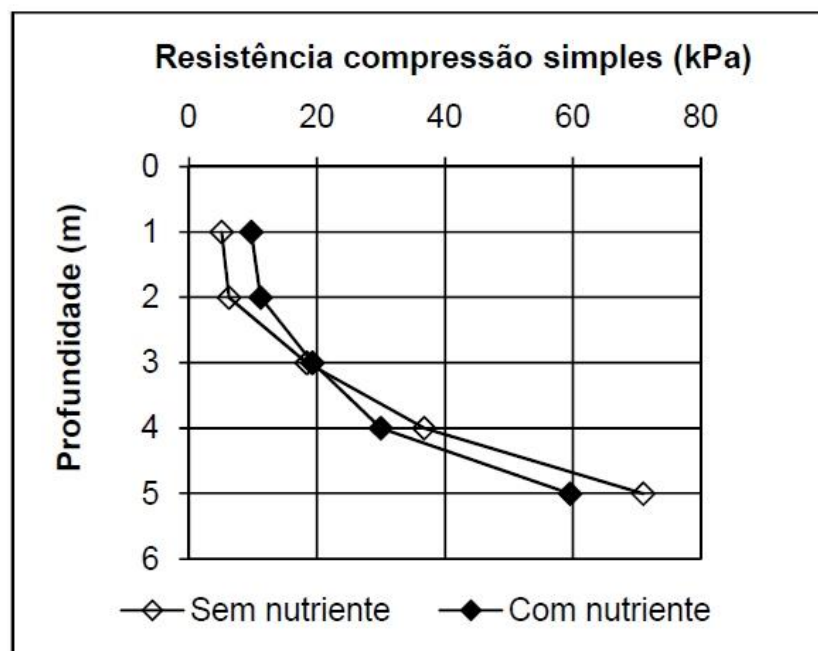
Figura 21 - Ensaio de resistência à compressão simples do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 74.

Nos dois primeiros metros ocorreram uma melhora no comportamento relativo à resistência de compressão simples do solo tratado (FIG. 22).

Figura 22 - Variação da resistência à compressão simples com a profundidade no perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, tratado com nutrientes.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 136.



Comparou-se o comportamento em relação à resistência à compressão simples do perfil de solo natural com o perfil de solo tratado e verificou-se que houve uma melhora efetiva na resistência dos solos tratados.

A permeabilidade foi determinada a partir do ensaio de carga constante, de acordo com a Norma NBR13292 (ABNT 1995) ou carga variável, de acordo com a Norma NBR14545 (ABNT 2000).

A FIG. 23 mostra a preparação para o ensaio de permeabilidade.

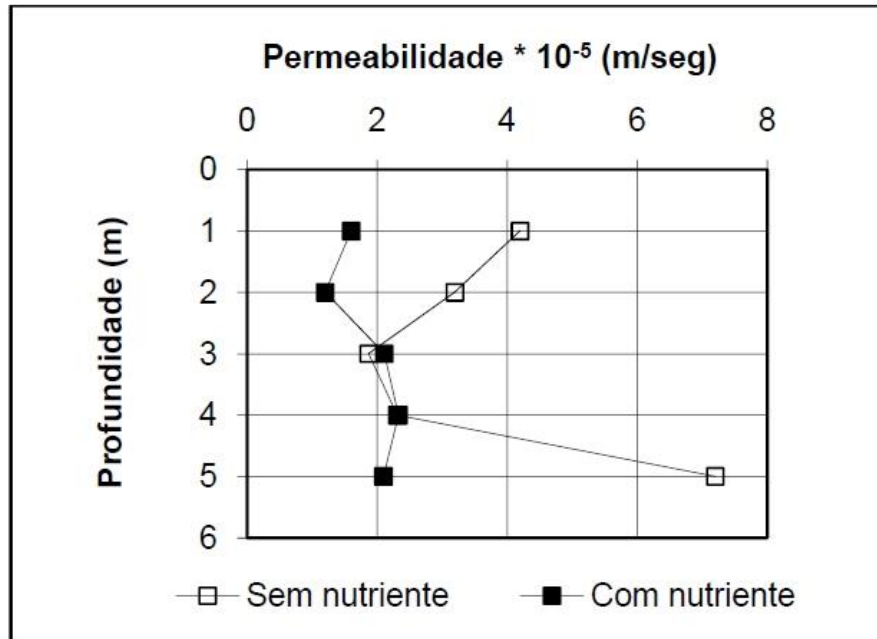
Figura 23 – Montagem do ensaio de permeabilidade para o perfil de solo da voçoroca de Santa Maria.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 81.

Ocorreu uma pequena diminuição da permeabilidade nos dois primeiros metros e também no último metro, o que concordou com as reduções do índice de vazios. A FIG. 24 apresenta a variação da permeabilidade de acordo com a profundidade do solo.

Figura 24 - Variação da permeabilidade com a profundidade do perfil de solo da voçoroca de Santa Maria, natural e com nutriente.



Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 151.

O tratamento dos solos proporcionou redução da permeabilidade, em virtude da precipitação de carbonato de cálcio que reduziu o índice de vazios.

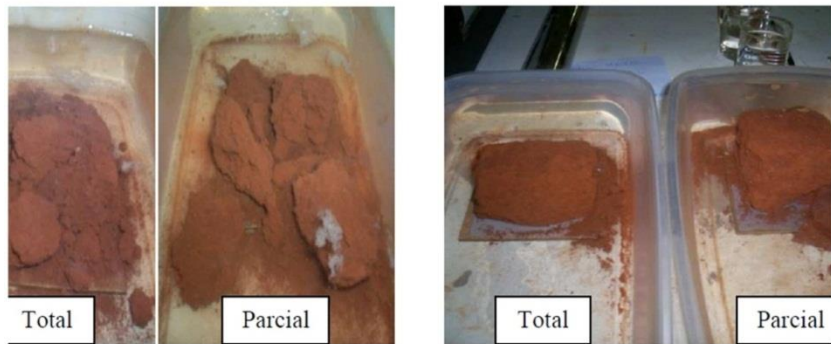
O ensaio de desagregação teve a finalidade de analisar a estabilidade de uma amostra de solo indeformada quando imersa em água destilada, independente da dispersão do material. Considerou-se que solos altamente erodíveis desagregam completamente em água, o que indica que o resultado é puramente qualitativo. No ensaio utilizou-se duas amostras de solos cúbicas de 60cm x 60cm x 60cm, onde uma delas foi submetida à imersão total, mantida dentro da água por 24 horas, e a outra foi submetida à imersão parcial. Primeiramente, as amostras foram colocadas sobre uma pedra com o nível da água na base da amostra de solo, no qual permaneceu por um período de 30 minutos. Depois o nível da água foi aumentado gradativamente para 1/3, depois para 2/3 da altura do corpo de prova, com um intervalo de 15 minutos entre essas fases. A fase em que a amostra encontrou-se completamente imersa foi mantida por 24 horas. A FIG. 25 mostra o ensaio de desagregação dos perfis de solo, com e sem nutriente

Figura 25 - Imagens dos ensaios de desagregação após 24 horas de imersão (com inundação parcial e total) nas amostras dos perfis de solos da voçoroca de Santa Maria.



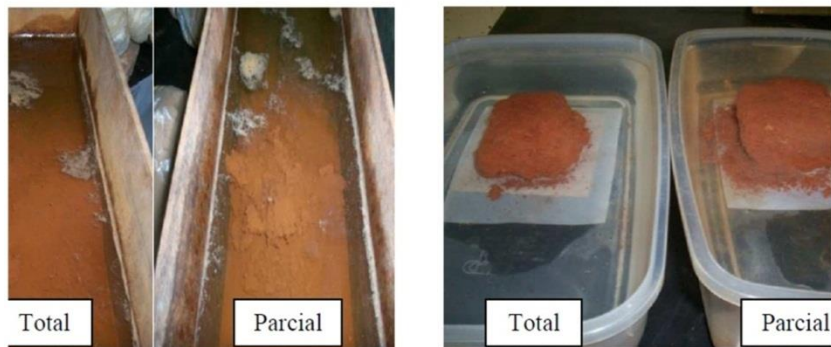
a) 1m Sem nutriente

b) 1m Com nutriente



c) 2m Sem nutriente

d) 2m Com nutriente



e) 3m Sem nutriente

f) 3m Com nutriente



g) 4m Sem nutriente

h) 4m Com nutriente

Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 155.

Durante o ensaio foi anotado as considerações em relação à desagregação do solo, se foi total, em pedaços ou se permaneceu intacto. As observações foram feitas com o solo sem nutriente (TAB. 9) e com nutriente (TAB. 10).

Tabela 9 - Resultados do ensaio de desagregação das amostras dos perfis de solo da voçoroca de Santa Maria, sem nutriente.

Solo sem nutriente					
Imersão parcial até total					
Fases	1m	2m	3m	4m	5m
Base do corpo	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
1/3 da altura do corpo	Desagregação total	Desagregação pouco na base	Desagregação pouco na base	Desagregação pedaços	Intacta
2/3 altura do corpo	Desagregação total	Desagregação pedaços	Desagregação pouco na base	Desagregação pedaços	Intacta
Total 24 horas	Desagregação total	Desagregação pedaços	Desagregação total	Desagregação pedaços	Intacta, só pó
Imersão total					
Fases	1m	2m	3m	4m	5m
Total 24 horas	Desagregação total	Desagregação pedaços	Desagregação total	Desagregação pedaços	Fraturada

Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 154.

Foi observado a pouca ou até nula desagregação do solos tratados quando imersos na água, principalmente em relação às amostras de solo naturais, o que comprova a melhoria da estabilidade dos solos tratados (TAB 10).

Tabela 10 - Resultados do ensaio de desagregação das amostras dos perfis de solo da voçoroca de Santa Maria, com nutriente.

Solo com nutriente					
Imersão parcial até total					
Fases	1m	2m	3m	4m	5m
Base do corpo	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
1/3 da altura do corpo	Desagregação só uma ponta da base	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
2/3 altura do corpo	Desagregação em duas pontas	Intacta	Intacta	Intacta	Intacta
Total 24 horas	Desagregação em duas pontas	Só um caiu o canto inferior	Intacta	Intacta	Intacta
Imersão total					
Fases	1m	2m	3m	4m	5m
Total 24 horas	Desagregação total	Intacta	Intacta	Desagregação um pouco	Intacta

Fonte: GONZÁLEZ, 2009, p. 155.

Os ensaios permitiram determinar qualitativamente a erodabilidade dos solos e verificou-se que o tratamento permitiu a redução da erodibilidade das amostras de solos estudados. Por esse motivo, foi constatado a eficiência da técnica de tratamento do solo para mitigação de processos erosivos em perfis de solos com as características do solo estudado.

Diante das melhorias verificadas nas propriedades e comportamentos do solo com tratamento, concluiu-se no estudo que a técnica de biomineralização se constitui em uma opção viável para o controle de processos erosivos.

#### 5.1.4 Estudo D: Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogrout experiment (PAASSEN et al., 2010)

Há poucos casos práticos onde houve a possibilidade de transportar o que foi feito em laboratório para uma escala maior. O estudo D, Paassen et al. (2010), realizado na Holanda, investigou a técnica em uma escala maior, simulando condições de campo. Foram tratados 100 m<sup>3</sup> (8 m x 5,6 m x 2,5 m) de solo arenoso (FIG. 26).

Figura 26 – Montagem do ensaio de tratamento do solo por Paassen (2010): circulação dos fluídos através da areia entre os três furos de injeção, à esquerda e os três furos de extração, à direita.



Fonte: CARDOSO; COSTA, 2016, p. 14.

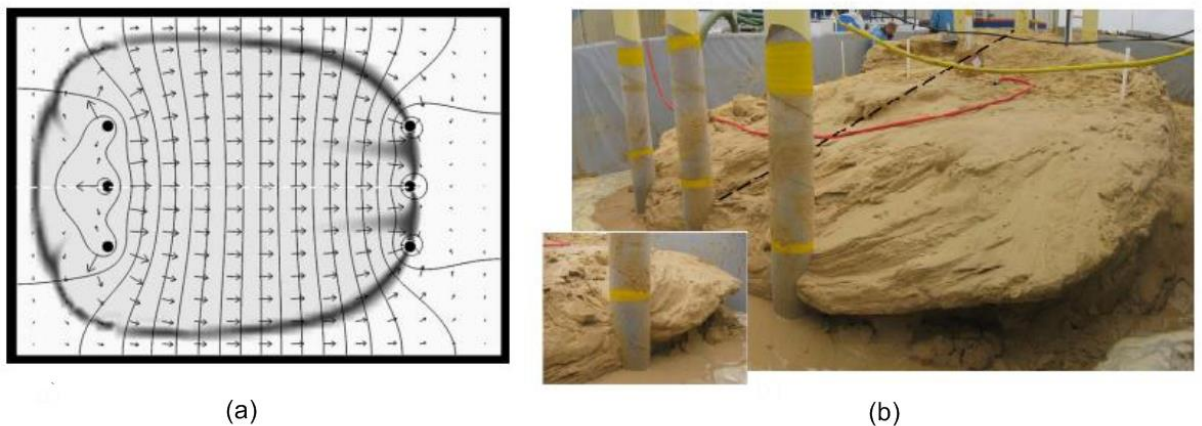
O trabalho usou o processo microbiológico, ou seja, adicionou ao solo as bactérias e o líquido de alimento, o qual fornece nutrientes necessários para a sobrevivência das mesmas. Foram utilizados 5 m<sup>3</sup> de solução de bactérias, 5 m<sup>3</sup> de 0,05 mol/L de CaCl<sub>2</sub> e 96 m<sup>3</sup> de ureia, em concentração de 1 mol/L.

A solução foi introduzida ao solo através de três poços de injeção, sendo extraído o efluente através bombas localizadas no interior de três poços de extração. O processo teve duração de 16 dias. Os três poços de injeção, assim como os

poços de extração, estavam afastados entre si por uma distância de 1 m e distanciados do limite do aterro por 1,5 m. A distância percorrida do fluido é de 5 m.

Após o tratamento, foram percolados 30 m<sup>3</sup> de água com a finalidade de retirar os subprodutos da reação. Posteriormente, o solo foi escavado. Foi observado pelo aspecto do aterro a presença da solidificação do solo, e também o aspecto rochoso do solo (FIG. 27).

Figura 27 - Ensaio de tratamento do solo por Paassen (2010): (a) vista superior com fluxo de injeções; (b) volume de solo no final do melhoramento.



Fonte: PAASSEN et al, 2010 p. 14.

Foi constatado que aproximadamente 40 m<sup>3</sup> de volume do solo, o que equivale a 40 % do volume total, tornou-se bio cimentado. Foi realizado um ensaio de reflexão sísmica para analisar o ganho de resistência durante o tratamento, e após o tratamento foi realizado ensaio de compressão simples para avaliar a resistência obtida. Os resultados demonstraram a técnica eficiente, visto que 40% do solo mostrou visivelmente mais resistente através da calcite formada pelas bactérias entre as partículas. Foi questionado no estudo a distribuição das bactérias, para uma uniforme localização do carbonato de cálcio, ou seja, a homogeneidade do tratamento no solo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os diversos artigos e trabalhos estudados, foram selecionados 4 autores que obtiveram os melhores resultados, no qual utilizou-se a técnica de biocimentação e analisou-se os comportamentos do solo. Cada estudo utilizou substâncias e concentrações diferentes, assim como o método da técnica também foi variado. O Quadro 6 apresenta um resumo das substâncias, métodos e ensaios dos quatro estudos principais.

Quadro 6 - Resumo das informações extraídas es estudos anteriores sobre biomineralização do solo.

Autores	Substâncias utilizadas	Método de aplicação da técnica	Principais ensaios realizados estudados
Garbin, 2016	Peptona (2g/L), extrato de levedura (1g/L); Cloreto de Amônio (10 g/L), bicarbonato de Sódio (2,12g/L), ureia (30g/L), cloreto de Cálcio (56g/L).	Percolação periódica gravitacional.	Compressão simples, análise de imagem pelo MEV
Costa, 2016	Enzima urease derivada de planta legumisona (0,32g/800mL), goma guar e bentonita sódica (0,32g/800mL), ureia (77g/800mL), cloreto de cálcio (94,08g/800mL), hidróxido de sódio.	Introdução das substâncias ao solo	Permeabilidade
González, 2009	Acetato de cálcio (15g/L), extrato de levedura (4g/L), glicose (5g/L), ágar (12g/L).	Introdução das substâncias ao solo	Granulometria, análise de imagem pelo MEV, compressão simples, permeabilidade, sedimentação
Paassen, 2010	Solução de bactérias (5m <sup>3</sup> ), cloreto de Cálcio (5m <sup>3</sup> de 0,05 mol/L, ureia (96m <sup>3</sup> p/ 1 mol/L).	Introdução das substâncias por poços de injeção durante 16 dias	Ensaio realizado em escala maior, analisou-se o volume do solo sedimentado.

Fonte: O autor (2017)

Nota: Informações extraídas: GARBIN (2016); COSTA (2016); GONZÁLEZ (2009), PAASSEN et al. (2010).



Nota-se pelo Quadro 5, a variedade de diferentes arranjos e concentrações de substâncias possíveis para a precipitação de carbonato de cálcio no solo. O que indica uma abrangência de escolhas para utilização da técnica, e traz a sugestão para estudos abordando qual seria o melhor meio nutriente para a precipitação de calcita no solo.

No estudo de Garbin (2016) não houve adição de novas bactérias, ou seja, as reações ocorreram a partir da ação das bactérias nativas do solo. O estudo mostrou resultados favoráveis, o que indica que, solos que possuem alta proporção de bactérias indutoras de precipitação de carbonato de cálcio podem apresentar grande disposição para a aplicação da técnica.

Costa (2016) utilizou a enzima urease proveniente da planta leguminosa conhecida por feijão de porco, o que demonstra que a técnica não necessita de processos altamente industrializados ou esforços mecânicos complexos. Nos ensaios realizados, adicionou-se goma guar e bentonita sódica ao meio precipitado, além de ensaiar apenas com o meio precipitado. Isso mostra a possibilidade de investigar possíveis substâncias que potencializem o efeito da biocimentação. Os ensaios realizados por Costa (2016) apresentaram resultados satisfatórios envolvendo a redução da permeabilidade, o que confirma o estudo bibliográfico.

Utilizou-se amostras de solo em estado erosivo nos ensaios do estudo de González (2009) e obteve-se resultados favoráveis, o que sugere-se que a técnica de precipitação de carbonato de cálcio pode ser viabilizada para o tratamento de solos erosivos.

O estudo de Paassen (2010), foi o único realizado em escala maior, e optou por introduzir as substâncias ao solo por meio de três poços de injeção. Após o solo tratado constatou-se que houve a sedimentação deste, porém houve a falta de homogeneidade do tratamento. Cabe o questionamento se a falta de homogeneidade tem relação com a maneira de introdução do meio nutriente ao solo. Como foram apenas três poços de injeção, há a possibilidade das bactérias não terem conseguido explorar todo o espaço disponível para reagirem precipitando carbonato de cálcio. É importante a investigação de métodos de introdução dos nutrientes ao solo que propõe o preenchimento integral e homogêneo da solução ao terreno.

A biocimentação mostrou capacidade de melhoramento da estrutura do solo perante os estudos abordados. Dentro da literatura estudada, confirma-se que

quando ocorre precipitação de carbonato de cálcio nos espaços vazios do solo, este altera sua estrutura.

### **6.1 Permeabilidade**

Diante dos estudos analisados, dois deles realizaram teste de permeabilidade e um deles analisou o volume do efluente durante o ensaio.

No estudo de Costa (2016), houve redução na permeabilidade, até mesmo nas amostras que continham apenas o precipitado de carbonato de cálcio para tratamento do solo. As amostras que continham os adicionais goma guar e bentonita sódica apresentaram redução ainda maior na permeabilidade. O que se constata que a técnica de biocimentação permite a inserção de outras substâncias para a finalidade de diminuir a permeabilidade. Garbin (2016) calculou a porcentagem do volume drenado ao longo do ensaio, e notou que esse apresentou considerável redução. González (2009) em seu estudo, também avaliou a permeabilidade e houve redução dessa, o que foi encadeado pela redução do índice de vazios. Ou seja, a técnica apresenta-se eficiente para redução da permeabilidade pela capacidade de redução de vazios, devido a precipitação de carbonato de cálcio nos poros.

Diante das pesquisas em artigos, constata-se a eficiência da técnica na redução da permeabilidade, visando analisar as substâncias a serem adicionadas ao solo de acordo com o índice de impermeabilidade desejado. O controle da permeabilidade é desejável para fins geotécnicos como construção e manutenção de barragens, diques e áreas erosivas, portanto considera-se útil o estudo para futuras aplicações.

### **6.2 Resistência à compressão simples**

No estudo de Garbin, a amostra ensaiada a compressão simples resistiu a uma considerável carga, porém não foi realizado o ensaio com o solo antes de ser tratado. Contudo pode-se avaliar o estado do solo antes de ser tratado não se apresentava na forma cilíndrica, o que representa que o solo sedimentou-se após o tratamento. Nos ensaios de compressão simples executados na tese de González (2009), observou-se o melhoramento da resistência em relação ao solo não tratado

nos dois primeiros metros. O que mostra que houve a precipitação de carbonato de cálcio nessa área. O preenchimento dos espaços vazios do solo pela precipitação de carbonato de cálcio contribui para o aumento da capacidade de resistência do solo, porém é necessário mais estudos aprofundados para se obter melhores dados e conclusões sobre esse aumento.

### **6.3 Presença de precipitado de carbonato de cálcio**

As imagens obtidas pelo MEV, referente aos artigos estudados, apresentaram presença de precipitação de carbonato de cálcio, o que representa a eficiência das reações no solo.

As calcites formadas se apresentaram de diversas formas, como em fibras ou em forma de losango e até circular. A presença da calcite implica na diminuição do índice de vazios, já que esta se precipita nos poros do solo. Como já referido, a redução do índice de vazios interfere na estrutura do solo, além de reduzir a permeabilidade.

No estudo de González (2009), observou-se que após o tratamento do solo, este mudou sua classificação das amostras de solo dos primeiros metros, passando a apresentar um caráter arenoso, o que, aliado à redução do índice de vazios considera-se um melhoramento no arranjo do solo, tornando-o menos suscetível à condições erosivas. O que pode ser confirmado pelo ensaio de desagregação, que revelou o estado intacto das amostras tratadas quando submersas à água por um determinado período. Nota-se que as amostras naturais se desagregaram em sua maioria, o que representa a maior estabilidade física do solo quando tratado, direcionando para uma possível aplicabilidade em áreas erosivas.

No experimento de escala maior de Paassen (2010) notou-se 40% de área do solo tratado em estado sedimentado, o que demonstra a eficiência das reações das substâncias adicionadas ao solo e a real melhora da estrutura do terreno para fins geotécnicos.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou os fundamentos da técnica da biocimentação, analisando suas diretrizes e ressaltando suas influências no solo, bem como as possibilidades de aplicações geotécnicas.

Foram abordadas as técnicas de biocimentação já realizadas em estudos acadêmicos, analisando os métodos de execução e seus resultados. Observou-se que os estudos já realizados apresentaram diferentes substâncias possíveis para a indução de precipitação de carbonato de cálcio, o que entende-se que essa possibilidade de escolhas é uma vantagem a ser explorada. As técnicas apresentadas utilizadas para adicionar a substância cimentante ao solo, revelaram a falta de homogeneização de material precipitado no solo. Desta forma, propõe-se que seja oportuno o estudo de novos métodos de introdução dos agentes cimentantes ao solo, visando preencher de forma integral e homogênea o terreno em estudo.

Foi exposto diversas influências da biocimentação em propriedades do solo, como redução do índice de vazios, redução da permeabilidade e ganho de resistência à compressão simples. Diante disso, entende-se que a biocimentação é aplicável na área geotécnica onde se tiver o intuito de diminuir a permeabilidade do solo, ou melhorar o comportamento mecânico deste. Sendo as aplicações mais favoráveis: barragens de terra, diques, taludes, além de possibilitar o tratamento de solos erosivos. Ressalta-se que até o momento, tem-se conhecimento da aplicabilidade da técnica apenas para estudos acadêmicos, o que sugere-se que por início, essa seja aplicada como complementação das técnicas já existentes, buscando a progressão da eficiência.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A técnica de biocimentação ainda é recente e há poucos estudos sobre o contexto, visto que até então os resultados dos estudos já realizados demonstraram-se satisfatórios, o que torna relevante outras pesquisas sobre o tema.

Recomenda-se estudos mais detalhados sobre os diferentes meios nutrientes indutores de precipitação de carbonato de cálcio, analisando as proporções dos compostos contínuos e comparando o melhor meio precipitador.

Outro aspecto relevante a ser estudado se refere ao método de execução da técnica, onde há a necessidade de se obter um tratamento homogêneo e integral no solo tratado. Deve-se buscar então, um método no qual a solução cimentante atinja todos os pontos do solo a ser tratado, alcançando assim a cimentação completa de toda a área do solo.

Em pesquisas futuras é recomendável também buscar a realização de ensaios em campo, de forma a simular a aplicação da biocimentação em larga escala.

Nessa pesquisa foram mencionadas as alternativas de possibilidade de aplicações da técnica de biocimentação, no entanto, sugere-se abordar detalhadamente a aplicação da biocimentação dentro da engenharia civil, analisando todas as diretrizes como: melhores substâncias para a biocimentação, implementação, aceitação social, probabilidade de sucesso além da viabilidade técnica e econômica.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE COMERCIALIZAÇÃO DE TECNOLOGIA (ACT). **Processo para a aplicação da técnica de biomineralização na melhoria de solos.** Disponível em: <<http://www.cdt.unb.br/vitrinetecnologica/files/solucoes/128.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.

ALLEONI, L. R. F; MELO, V. de F. **Química e Mineralogia do solo – Conceitos básicos.** Viçosa: SBCS, 2009.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização Física e Classificação dos Solos.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de transportes. Juiz de Fora, 2005. Disponível em <[http://ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/APOSTILA\\_SOLOS.pdf](http://ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/downloads/material%20de%20apoio/APOSTILA_SOLOS.pdf)>. Acesso em: 07 jul.2017.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de Química - Questionando a vida moderna e o meio ambiente.** Porto Alegre: Bookman, 2012.

Biorocha: Agricultura e biomineralização. **Biomineralização.** Disponível em: <<http://biobacters.webnode.com.br/biomineraliza%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 16 out. 2017.

BRADY, N. C; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** Porto Alegre: Bookman, 2009.

CARDOSO, A. S.; COSTA, P. A. Desenvolvimento da geotécnica - Algumas perspectivas específicas. **Geotecnia**, Lisboa, v. 137, n. 4, p. 5-20, jul. 2016. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/links/revistageotecnia/Revista137.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.

CARDOSO, E. J. B. N. ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo.** Piracicaba: ESALQ, 2016.

CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. **Microbiologia do solo.** Campinas: SBCS, 1992.

COSTA, N. S. D. **Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante para estabilização do solo.** 2016. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Ambiental)-Universidade Federal Tecnológica do Paraná, 2016. Disponível em <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5069/1/CM\\_COEAM\\_2016\\_1\\_17.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5069/1/CM_COEAM_2016_1_17.pdf)>. Acesso em 09 mai. 2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012. 1 v.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DAS, B. M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2011.

DEJONG, J. T.; FRITZGES, M. B.; NÜSSLEIN, K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Estados Unidos, n. 132, p. 1381-1391. Disponível em

<[https://www.researchgate.net/publication/238545230\\_Microbially\\_Induced\\_Cementation\\_to\\_Control\\_Sand\\_Response\\_to\\_Undrained\\_Shear](https://www.researchgate.net/publication/238545230_Microbially_Induced_Cementation_to_Control_Sand_Response_to_Undrained_Shear)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

DEJONG, J. T. ET al. **Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges**. 2009. Disponível em:  
<<http://dx.doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>>. Acesso em 04 ju. 2017.

DEJONG, J. T.; MORTENSEN, B. M.; MARTINEZ, B. C.; NELSON, D. C. Bio-mediated soil improvement. **Ecological Engineering**, Estados Unidos, n. 36, p. 197-210, 2010. Disponível em  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857409000238>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

FORNARI, M. R. **Propriedades físicas do solo**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, 2016. Disponível em  
<<http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Dissertacoes/MAYARA-REGINA-FORNARI.pdf>>. Acesso: 06 jul. 2017.

GARBIN, R. G. **Estudo de biocimentação em solo arenoso**. 2016. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Civil)-Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016. Disponível em  
<[https://www.researchgate.net/publication/311367281\\_Biocimentation\\_study\\_on\\_sandy\\_soil\\_-\\_Estudo\\_de\\_Biocimentacao\\_em\\_solo\\_arenoso](https://www.researchgate.net/publication/311367281_Biocimentation_study_on_sandy_soil_-_Estudo_de_Biocimentacao_em_solo_arenoso)>. Acesso em 09 mai. 2017.

GONZÁLEZ, Y. V. **Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado**. 2009. 208 p. Tese (Doutorado em Geotecnia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em:  
<<http://repositorio.unb.br/handle/10482/6907>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

GONZÁLEZA, Y. V.; SANTANA, A. P.; CARVALHO, J. C. Bactérias nativas indutoras de precipitação de minerais de carbonato de cálcio em solos tropicais. **Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología**, Colômbia, n. 34, p. 15-21, nov. 2013. Disponível em  
<[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1315-25562014000100005](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562014000100005)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE (IFRN). **Origem e formação dos solos**. Disponível em:

<<https://docente.ifrn.edu.br/johngurgel/disciplinas/2.2051.1v-mecanica-dos-solos-1/apostila%20de%20solos.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2017.

KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Pedologia – Fundamentos**. Viçosa: SBCS, 2015.

PAASSEN, L. A. van et al. **Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment** Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/221932480\\_Quantifying\\_biomediated\\_ground\\_improvement\\_by\\_ureolysis\\_Large-scale\\_biogROUT\\_experiment](https://www.researchgate.net/publication/221932480_Quantifying_biomediated_ground_improvement_by_ureolysis_Large-scale_biogROUT_experiment)>.

Acesso em: 06 jul. 2017.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

MASSAD, F. **Obras de Terra - Curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Convenção Sobre Diversidade**

**Biológica – CDB**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/7513-conven%C3%A7%C3%A3o-sobre-diversidade-biol%C3%B3gica-cdb>>.

Acesso em: 16 out. 2017.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos** São Carlos-SP: Editora Escola de

Engenharia de São Carlos, 1988.

PAULA, L. P. **Influência da sucção na estabilidade de taludes**. 2007. 58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Gestão e inovações tecnológicas na construção civil)-Universidade Federal de Lavras-UFLA, Lavras. 2007.

PEDREIRA, R. R. **Bio – Cimentação de solos arenosos para melhoramento das suas características hidro-mecânicas**. 2014. 124 p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil)-Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em

<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067124252/TESE%20FINAL.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Editora Oficina de

textos. 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria.

2006. Disponível em

<[https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An\\_lise\\_da\\_zona\\_n\\_o\\_saturada\\_do\\_solo\\_\\_texto.pdf](https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__texto.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2017.

REIS, L. G. V. **Bioteχνologia Microbiana da construção: potencial de biomineralização de bactérias ureolíticas de solo cerrado e de rejeitos de**



**construção civil**. 2017. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais)- Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2017. Disponível em <[https://ciamb.prgg.ufg.br/up/104/o/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_DEFESA\\_-\\_Luann.pdf](https://ciamb.prgg.ufg.br/up/104/o/DISSERTA%C3%87%C3%83O_DEFESA_-_Luann.pdf)>. Acesso em: 06 jul. 2017.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE MICROBIOLOGIA (SBM). **Microbiologia do solo**. Disponível em: <<http://sbmicrobiologia.org.br/areas/microbiologia-do-solo>>. Acesso em: 02 jul. 2017.

SHUMACKER INSUMOS, **Bentonita sódica natural**. Disponível em: <<http://www.schumacherinsumos.com.br/bentonita.htm>>. Acesso em: 16 out. 2017.

Universidade de São Paulo (USP). E- Disciplinas: Sistema de apoio às disciplinas. **Arquitetura e propriedades físicas do solo**. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/917327/mod\\_resource/content/2/Apostila%20-%20Arquitetura%20e%20Propriedades%20F%C3%ADscas%20do%20Solo.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/917327/mod_resource/content/2/Apostila%20-%20Arquitetura%20e%20Propriedades%20F%C3%ADscas%20do%20Solo.pdf)>. Acesso em: 16 out. 2017.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Editora MC Graw, 1977.

VERMA, R. K.; BISHT, V.; THAKUR, M. Bio-Mineralization and Bacterial Carbonate Precipitation in Mortar and concrete. **Bioscience And Bioengineering**, Roorkee, India, v. 1, n. 1, 2015, p. 5-11, abr. 2015. Disponível em: <<http://files.aiscience.org/journal/article/pdf/70010018.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

WHIFFIN, V. S.; PAASSEN, L. A. van; HARKES, M. P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. **Geomicrobiology Journal**, Estados Unidos, n. 24, p. 417–423, ago. 2007. Disponível em <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01490450701436505>>. Acesso em: 06 jul. 2017.