

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

BIOCIMENTAÇÃO EM SOLO ARGILOSO RESIDUAL DE
BASALTO

Nicole Deckmann Callai

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

C156b Callai, Nicole Deckmann
Biocimentação em solo argiloso residual de basalto
[recurso eletrônico] / Nicole Deckmann Callai. – 2021.
7 MB ; PDF.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade de Passo Fundo, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Thomé.

Coorientador: Prof. Dr. Cleomar Reginatto.

1. Biocimentação. 2. Latossolos. 3. Formação do solo.
4. Bioprocesso. 5. Basalto. I. Thomé, Antônio, orientador.
II. Reginatto Cleomar, coorientador. III. Título.

CDU: 631.4

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569

Universidade de Passo Fundo
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental

Nicole Deckmann Callai

BIOCIMENTAÇÃO EM SOLO ARGILOSO RESIDUAL DE
BASALTO

Passo Fundo

2021

Nicole Deckmann Callai

**BIOCIMENTAÇÃO EM SOLO ARGILOSO RESIDUAL DE
BASALTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Thomé

Coorientador: Prof. Dr. Cleomar Reginatto

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Pavan Korf (UFFS)

Prof. Dr. Márcio Felipe Floss (UPF)

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto (UPF)

Passo Fundo
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, em especial às mulheres da minha vida, **mãe e avó**, que, embora não estejam mais comigo fisicamente, sempre serão meus maiores exemplos de força e dedicação e é por elas que eu insisto em continuar.

“Por trás de toda mulher forte existe outra mulher forte ajudando-a a ser forte nos dias mais difíceis. Nenhuma de nós é forte o tempo todo. Somos a soma das forças das mulheres que caminham ao nosso lado.”

Autora desconhecida

AGRADECIMENTOS

Ao encerrar mais uma etapa da minha vida acadêmica, gostaria de deixar meus agradecimentos a todos que contribuíram para que ela fosse mais proveitosa e prazerosa.

Primeiramente, agradeço ao meu pai pelo incentivo, pelo apoio, pelo amor e por sempre ter colocado a minha educação como prioridade máxima em sua vida. Obrigada por compreender as ausências e a distância. Espero, algum dia, conseguir retribuir de alguma forma.

Ao Renato, meu companheiro, pela presença em todos os momentos, por acreditar em mim, me incentivar, e por ter se tornado a maior e melhor parte desse período. Obrigada por dividir a vida comigo.

A todos os meus amigos e amigas, os de longa data e aqueles que eu tive o prazer de conhecer durante essa caminhada. Obrigada pela companhia, pelas conversas, pelo apoio e pelo tempo dividido. Em especial, agradeço à Andressa por me lembrar todos os dias do significado de amizade verdadeira e segurar a barra comigo em absolutamente todos os momentos.

Ao meu orientador, Antônio Thomé, pela sabedoria pacientemente e generosamente compartilhada, pela tranquilidade e confiança transmitida durante todo esse processo. Tens minha admiração e minha eterna gratidão.

À Universidade de Passo Fundo, ao PPGEng e à CAPES, instituições sem as quais a realização dessa conquista não seria possível.

Ao Leunir, pelo auxílio, conhecimentos passados e ideias compartilhadas, sempre com muito bom humor e muita disposição. Definitivamente, é a essência do CETEC.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa em remediação e biocimentação de solos, incluindo meu coorientador Cleomar Reginatto, pela troca de experiências e conhecimentos, auxílios em laboratório, conversas e construção conjunta de aprendizado.

Por último, mas não menos importante, agradeço especialmente à minha avó, que me viu iniciar o mestrado, mas infelizmente não pôde me ver terminar. Obrigada por me ensinar o significado de amor incondicional.

E claro, sou e serei eternamente grata à minha mãe, que é meu maior exemplo e minha maior inspiração. Obrigada por ter me ensinado tanto em tão pouco tempo. Tenho certeza que me acompanhas sempre, aonde quer que estejas.

A todos que por ventura não tenham sido citados, mas contribuíram direta ou indiretamente com essa conquista. Obrigada!

RESUMO

Os processos biotecnológicos vêm ganhando destaque na construção civil, especialmente em um momento em que se buscam materiais e/ou técnicas alternativas e sustentáveis para suprir a crescente demanda por infraestrutura urbana. A biocimentação é um processo microbiológico de precipitação de carbonato de cálcio utilizado para melhoria das propriedades de solos, como aumento da resistência à compressão e redução da permeabilidade de solos arenosos, porém ainda encontra muitas limitações quanto à aplicação em solos de grãos finos. Pensando nisso, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da biocimentação em um latossolo argiloso residual de basalto, analisando a influência do método de aplicação da solução de alimentação na precipitação da calcita e sua consequente resposta mecânica. Para tanto, foram extraídas amostras indeformadas de solo cilíndricas de 5,3cm de diâmetro e 8cm de altura, posteriormente submetidas à percolação/injeção da solução biocimentante, e realizado o ensaio de compressão simples para analisar a influência do método de aplicação na eficiência da biocimentação. Também foram realizados os ensaios de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e espectroscopia no infravermelho (FTIR) para avaliar a ocorrência e distribuição da calcita pelos corpos de prova. Baseado em resultados de ensaio que analisava a influência do índice de vazios e da umidade de moldagem na precipitação da calcita, decidiu-se pela utilização de amostras indeformadas dado que nenhum dos fatores analisados exerceu influência significativa na biocimentação dos corpos de prova. Os resultados do ensaio de compressão simples não foram estatisticamente diferentes para as amostras biocimentadas e não biocimentadas, sendo que os corpos de prova percolados apresentaram resistência média de 38,24kPa, os injetados de 33,80kPa e os brancos de 29,01kPa, todos com elevados desvios padrão devido à grande variabilidade dos dados. Os resultados de resistência à compressão foram atribuídos aos índices de vazios das amostras, que apresentavam certa discrepância devido à heterogeneidade do solo. Foi observada uma correlação de Pearson de -0,54 entre índice de vazios e resistência à compressão, indicando uma dependência inversa. A difração e a fluorescência comprovaram a existência de maior quantidade de carbonato de cálcio no terço superior das amostras em comparação com os terços médio e inferior, indicando que a eficiência da biocimentação diminui com o aumento da profundidade. O ensaio FTIR caracterizou mineralogicamente as amostras, apontando a existência de carbonato de cálcio nas biocimentadas. Por fim, conclui-se que nem a percolação e nem a injeção foram métodos eficientes para melhoria do comportamento mecânico do solo, pois proporcionam a ocorrência da biocimentação mas não em quantidade suficiente e nem em distribuição uniforme pelos corpos de prova.

Palavras-chave: MICP, Melhoramento do solo, Solos finos, Bioprocesso.

ABSTRACT

Biotechnological processes have been gaining prominence in civil construction, especially at a time when alternative and sustainable materials and/or techniques are being sought to supplement the growing demand for urban infrastructure. Biocementation is a microbiological process of calcium carbonate precipitation used to improve the soil properties, such as increased compressive strength and reduced permeability of sandy soils, but still finds many limitations on application in fine-grained soils. Based on that, the objective of this work is to evaluate the efficiency of biocementation in a basalt clayey oxisol, analyzing the influence of the application method of the feed solution on the calcite precipitation and its consequent mechanical response. For that, undisturbed cylindrical soil samples of 5,3cm in diameter and 8cm in height were extracted, subsequently subjected to percolation/injection of the biocementing solution, and a simple compression test was performed to analyze the influence of the application method on the biocementation efficiency. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and infrared spectroscopy (FTIR) tests were also performed to assess the calcite occurrence and distribution across the samples. Based on test results that have analyzed the influence of the void index and molding humidity on calcite precipitation, it was decided to use undisturbed samples since none of the factors analyzed have had a significant influence on the specimens biocementation. The results of the simple compression test were not statistically different for the biocemented and non-biocemented samples, with the percolated specimens showing 38,24kPa of average resistance, the injected specimens showing 33,80kPa and the white specimens, 29,01kPa, all of them with high standard deviations due to the great data variability. The compressive strength results were attributed to the sample void indices, which showed some discrepancy due the soil heterogeneity. A Pearson correlation of -0,54 was observed between void index and compressive strength, indicating an inverse dependence. Diffraction and fluorescence proved the existence of a greater calcium carbonate amount in the sample upper third compared to the middle and lower thirds, indicating the biocementation efficiency decreases with increasing depth. The FTIR test has been characterized mineralogically the samples, showing the calcium carbonate existence in the biocemented ones. Finally, it is concluded that neither percolation or injection were efficient methods to improve the soil mechanical behavior, because they provide biocementation occurrence, but not in sufficient quantity or even in uniform distribution among the samples.

Key-words: MICP, Ground improvement, Fine soils, Bioprocess.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de precipitação de carbonato de cálcio	20
Figura 2 - Esquema de precipitação de carbonato de cálcio pelas células bacterianas	21
Figura 3 - Soluções geotécnicas que fazem uso da MICP.....	26
Figura 4 - Diferenças entre os taludes tratados e não tratados sob ação da água	29
Figura 5 - Sequência executiva da MICP para aplicação em bases de pavimentos: a) mistura dos finos de calcário, resíduos de milho, solução bacteriana e ureia; b) aplicação da mistura sobre camada de brita graduada; c) aspecto final da camada do pavimento tratada com MICP	31
Figura 6 - MEV do solo tratado com cimentação e MICP	32
Figura 7 - Comportamento da areia e da mistura de areia e caulim, no estado natural e biocimentado	35
Figura 8 - Curva granulométrica do solo.....	40
Figura 9 - Resultado do teste de urease dos microrganismos isolados do solo	41
Figura 10 - Fluxograma geral da pesquisa	43
Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova em prensa hidráulica.....	44
Figura 12 – Geotêxtil para proteção da parte inferior do corpo de prova	45
Figura 13 - Esquema para percolação da solução biocimentante nos corpos de prova.....	45
Figura 14 - Delineamento experimental da pesquisa.....	49
Figura 15 - Processo de extração e moldagem dos corpos de prova: a) abertura da trincheira; b) bloco de solo extraído; c) corpo de prova moldado a partir do bloco	50
Figura 16 - Aplicação das soluções nos corpos de prova	51
Figura 17 – Agulhas utilizadas nas injeções.....	52
Figura 18 - pH da solução e dos lixiviados dos corpos de prova	55
Figura 19 - Volume da solução e dos lixiviados dos corpos de prova	56
Figura 20 - Evolução do pH e volume lixiviado do CP5 durante o experimento.....	57
Figura 21 - Média das concentrações de N (mg/L) e CaCO ₃ (mg/L) em relação ao CP.....	58
Figura 22 - Ensaio de contagem microbiológica para: a) CP1; b) CP5; c) solo natural.....	60
Figura 23 - pH dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à percolação.....	62
Figura 24 - pH dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à injeção	63
Figura 25 - Volume (mL) dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à percolação.....	64
Figura 26- Volume (mL) dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à injeção	65
Figura 27 - Formação do biocimento na região de inserção da agulha em corpo de prova injetado	66
Figura 28 - Boxplot 1 com outliers.....	69
Figura 29 - Boxplot 2 com outliers.....	70
Figura 30 - Boxplot 3 sem outliers	70
Figura 31 - Forma de ruptura dos corpos de prova: a) CP3; b) CP6; c) CP9 e d) CP20	72
Figura 32 - Resistência à compressão em função do índice de vazios das amostras	75
Figura 33 - Corpo de prova exumado em terço superior, médio e inferior	76
Figura 34 - Formação de calcita: a) concentrada nos vazios; b) em torno do solo	77
Figura 35 - Difração de raios X (DRX) para os percolados	79
Figura 36 - Difração de raios X (DRX) na região da calcita para os percolados	79
Figura 37 - Difração de raios X (DRX) para os injetados	81

Figura 38 - Difração de raios X (DRX) na região da calcita para os injetados	82
Figura 39 - Comparação dos difratogramas das amostras percoladas e injetadas.....	83
Figura 40 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) para os percolados.....	85
Figura 41 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) para os injetados.....	86
Figura 42 - Comparação dos espectros na região da calcita.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis Categóricos (NC) do SiBCS	17
Tabela 2 - Condições ótimas e incremento da resistência à compressão dos solos.....	35
Tabela 3 - Resultados dos ensaios realizados por Morales et al. (2019).....	36
Tabela 4 - Caracterização geotécnica, química e física do solo	40
Tabela 5 - Composição da solução biocimentante	42
Tabela 6 - Matriz real e codificada do experimento 1	44
Tabela 7 - Corpos de prova do experimento 2.....	48
Tabela 8 - Análise de nitrogênio amoniacal e dureza nos lixiviados	58
Tabela 9 - Efeitos estimados das variáveis sobre a concentração de nitrogênio	59
Tabela 10 - Efeitos estimados das variáveis sobre a dureza.....	59
Tabela 11 - Contagem bacteriana das amostras.....	60
Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples	67
Tabela 13 - Efeito do método de aplicação na resistência dos corpos de prova.....	67
Tabela 14 - Resultados das análises boxplot	69
Tabela 15 - Resultados do ensaio de compressão simples (sem outliers)	71
Tabela 16 - Efeito do método de aplicação na resistência dos corpos de prova (sem outliers)	71
Tabela 17 - Resistência à compressão e índices de vazios dos corpos de prova.....	74
Tabela 18 - Nomenclatura das amostras.....	77
Tabela 19 - Fluorescência de raios X (FRX) para os percolados	80
Tabela 20 - Fluorescência de raios X (FRX) para os injetados	83
Tabela 21 - Comparação da quantidade de CaO das amostras percoladas e injetadas.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos envolvendo biocimentação e solos finos	33
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Latossolos residuais	16
2.2	Biom mineralização	18
2.2.1	<i>Microbial Induced Calcite Precipitation</i> (MICP)	19
2.2.2	Fatores que influenciam a MICP	22
2.2.2.1	Uso de bactérias ureolíticas ou a enzima urease livre	22
2.2.2.2	Temperatura.....	23
2.2.2.3	pH	24
2.2.2.4	Concentração da solução biocimentante.....	24
2.2.3	Aplicações da MICP na engenharia geotécnica.....	25
2.2.3.1	Mitigação da liquefação	27
2.2.3.2	Controle de erosão	28
2.2.3.3	Construção ou reparação de estradas	30
2.2.4	A MICP e os solos argilosos.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1	Solo.....	39
3.2	Solução bacteriana	41
3.3	Solução biocimentante.....	42
3.4	Delineamento geral da pesquisa	42
3.5	Experimento 1.....	43
3.5.1	Nitrogênio amoniacal.....	46
3.5.2	Dureza.....	46
3.5.3	Contagem microbiológica.....	47
3.6	Experimento 2.....	47
3.6.1	Delineamento experimental	49
3.6.2	Extração das amostras.....	50
3.6.3	Aplicação das soluções nos corpos de prova.....	51
3.6.4	Ensaio de resistência à compressão simples	52
3.6.5	Difração de raios X (DRX).....	52
3.6.6	Fluorescência de raios X (FRX)	53
3.6.7	Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	54
4	RESULTADOS	55

4.1	Experimento 1.....	55
4.1.1	Nitrogênio amoniacal e dureza	57
4.1.2	Contagem microbiológica.....	59
4.1.3	Análise do experimento 1	60
4.2	Experimento 2.....	61
4.2.1	Resistência à compressão simples	66
4.2.2	Exumação dos corpos de prova	76
4.2.3	Difração de raios X (DRX) e Fluorescência de raios X (FRX).....	78
4.2.4	Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	84
4.2.5	Análise do experimento 2	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

Os processos biotecnológicos vêm ganhando visibilidade na ciência e engenharia por envolverem a produção de materiais construtivos por vias biológicas (IVANOV et al., 2015). Na engenharia geotécnica, entende-se por biotecnologia o ramo que estuda a aplicação de métodos microbiológicos em geomateriais (KHALEGHI; ROWSHANZAMIR, 2019). Dentre eles, destaca-se a biomineralização, definida como o processo de formação de minerais por organismos vivos, sejam estes procariontes ou humanos. A síntese dos minerais na biomineralização normalmente é realizada por meio de mecanismos ativos ou passivos, sendo considerados ativos os que envolvem o controle biológico da biomineralização por um dado microrganismo, e os passivos aqueles que envolvem a indução da biomineralização através da inserção de um microrganismo no meio (KRAJEWSKA, 2018).

Um tipo comum de biomineralização é a biocimentação, ou *Microbiologically induced calcite precipitation* (MICP), que consiste na formação e depósito de carbonato de cálcio em uma superfície por meio de processos biológicos (ACHAL et al., 2015). A MICP é um processo biogeoquímico comum que pode ocorrer de diversas maneiras, por meio da fotossíntese, ureólise, desnitrificação, amonificação, redução de sulfato ou oxidação de metano (MOUNTASSIR et al., 2018). De acordo com Mahawish et al. (2017), o método mais usual utilizado na biocimentação é o promovido a partir da enzima urease produzida por bactérias que catalisam a hidrólise da ureia em amônio e carbonato.

Por ser realizada por microrganismos encontrados naturalmente e em abundância no meio ambiente, a biocimentação é considerada uma alternativa sustentável em comparação à cimentação tradicional e tratamentos químicos utilizados para melhoria das propriedades dos materiais geotécnicos. Solos podem ser tratados ou melhorados sem que tenham a sua composição ou a do ambiente alteradas, visto que os microrganismos podem penetrar e se reproduzir em seu interior (CHU et al., 2015). Em alguns casos, os próprios microrganismos existentes *in natura* no solo, por meio de suas atividades metabólicas e correta estimulação, promovem a modificação das propriedades do material.

As biotecnologias aplicadas na construção civil apresentam muitas vantagens em comparação com os processos de construção convencionais; portanto, sua implementação pode trazer benefícios econômicos e ambientais significativos (IVANOV; STABNIKOV, 2016). Os principais fatores que afetam as aplicações de microrganismos na engenharia geotécnica incluem a triagem e identificação de microrganismos adequados para diferentes aplicações e ambientes distintos, a otimização da atividade microbiana *in situ*, a biossegurança da aplicação,

a relação custo-benefício e a estabilidade das propriedades do solo após a biomodificação. Entre todos os fatores, a relação custo-benefício é o fator mais importante para aplicações em larga escala (IVANOV; CHU, 2008).

Com o crescimento populacional e a conseqüente necessidade de desenvolvimento de infraestrutura urbana, o uso de materiais alternativos na construção civil torna-se necessário visando garantir a sustentabilidade na gestão dos recursos (KHALEGHI; ROWSHANZAMIR, 2019). Nesse sentido, técnicas de tratamento para materiais que, em seu estado natural, apresentam propriedades insatisfatórias para emprego na Engenharia Civil vêm ganhando espaço, especialmente no ramo da geotecnia (KRAJEWSKA, 2018). Para tanto, existem diversas técnicas de melhoria das propriedades dos solos, como compactação mecânica, rejuntamento químico, mistura com outros materiais mais resistentes, entre outras.

A MICP pode ser uma alternativa viável para melhorar as estruturas novas e existentes que sustentam o solo e tem sido usada em muitas aplicações na engenharia civil, como depósitos de areia sujeitas à liquefação, estabilização de taludes e reforço de subleitos (UMAR et al., 2016). Para a ocorrência da MICP nos solos, o fator permeabilidade é de extrema importância, já que é necessário espaço entre os grãos para a percolação da solução biocimentante e formação do biocimento. Devido a isso, a técnica é preferida para solos de natureza permeável ou semi-permeável, em sua maioria, solos de grãos grossos, como areias ou cascalhos (MUJAH et al., 2016). Como a permeabilidade do solo grosseiro é alta, a percolação dos fluidos por sua estrutura é possível. No entanto, os solos de grãos finos, em função de sua baixa permeabilidade, são mais difíceis de serem biocimentados (KEYKHA, 2014).

Além disso, segundo Ivanov et al. (2015), um grande problema é que o efeito do carbonato de cálcio nos solos argilosos de grãos finos ainda não foi bem compreendido. Portanto, o estudo da biocimentação na argila ainda é realizado com base em tentativa e erro, considerando, também, que poucos autores investigaram a atuação da MICP em solos argilosos. Diante disso, a busca pelo mecanismo de ocorrência da biocimentação em solos argilosos é necessária.

Os solos argilosos residuais encontrados no Rio Grande do Sul, no geral, apresentam resistência mecânica, quando compactados, inferior aos solos arenosos, caracterizando-se como materiais “ruins” do ponto de vista construtivo. Problemas que são frequentemente encontrados nesses solos são erosão, *piping*, baixas densidades secas compactadas e baixos índices CBR. A possibilidade de emprego da MICP em solos argilosos tornaria esta uma técnica alternativa e sustentável de melhoria das propriedades geotécnicas deste tipo de solo, necessitando investigação sobre a eficiência no estado compactado e não compactado. Desta maneira, abriria

uma ampla gama de aplicações para esses materiais, o que dispensaria o tratamento com outras técnicas mais trabalhosas e onerosas.

Na Universidade de Passo Fundo, Pacheco (2016) estudou a aplicação da biocimentação na areia de Osório e provou ser eficaz na redução da permeabilidade e no aumento da capacidade de carga deste material. Oliveira (2017) analisou o comportamento de solos arenosos biocimentados quanto à resistência ao *piping* e observou a necessidade de uma pressão de água de 7,5 a 15 vezes maior nas amostras tratadas para erodir a camada, em comparação aos sistemas sem tratamento. Ou seja, em estudos locais, a biocimentação provou ser uma técnica eficiente para tratamento de materiais arenosos, mas ainda não há resultados que correlacionem a efetividade da técnica em solos argilosos.

Um dos principais fatores limitantes para aplicação da biocimentação em argilas é a necessidade de uma boa permeabilidade para transporte dos nutrientes e/ou microrganismos produtores de biocimento, o que não existe nos solos argilosos estudados, com base em pesquisa sobre o estado da arte do assunto. Porém, os latossolos residuais de basalto característicos da região sul do Brasil são argilas com elevado índice de permeabilidade, e a biocimentação nesse tipo de solo proporcionaria resultados até então desconhecidos e inéditos para a comunidade científica.

Diante disso, o presente trabalho tem como foco o estudo da biocimentação em latossolos argilosos residuais, os efeitos em seu comportamento mecânico e interpretação de resultados da aplicação da técnica nesse tipo de material. O objetivo geral da pesquisa, portanto, é melhorar as propriedades geomecânicas de latossolos argilosos residuais para aplicações geotécnicas por meio da biocimentação. Os objetivos específicos são:

- a) Investigar a influência da umidade e do índice de vazios do solo sobre a biocimentação;
- b) Analisar a relação entre o método de aplicação da solução biocimentante e a precipitação de calcita;
- c) Analisar a distribuição da biocimentação nos corpos de prova e verificar se há relação com o método de aplicação da solução.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Latossolos residuais

Segundo Streck et al. (2018), Latossolos são solos bem drenados, normalmente profundos a muito profundos, que apresentem uma sequência de horizontes A-B-C (SALOMÃO; ANTUNES, 1998), com pouca diferenciação textural entre eles. A fração argila possui alto grau de floculação e é constituída, predominantemente, por óxidos de ferro (hematita, goetita), óxidos de alumínio (gibsita) e argilominerais do grupo 1:1 (caulinita). Resende et al. (1997) afirma que o predomínio da gibsite na fração argila dos Latossolos favorece maior agregação das partículas, resultando em elevados valores de permeabilidade.

Salomão e Antunes (1998) listam 5 principais fatores que influenciam a formação e evolução dos solos, quais sejam: clima (ação da água da chuva e da temperatura); materiais de origem (conteúdo mineral); organismos, vegetais e animais presentes no microclima; relevo (influência nos processos de erosão e sedimentação); e tempo. A combinação das rochas com o intemperismo, este último denominado por Mitchell e Soga (2005) como o processo destrutivo pelo qual se originam detritos de composições, formas e tamanhos distintos, representa o início do mecanismo de formação dos solos.

A partir desta etapa, distinguem-se duas grandes categorias de solos formados a partir de dois substratos pedogenéticos principais: residuais ou transportados. Os solos residuais originam-se da decomposição de rocha existente no local, enquanto que os transportados são os que foram deslocados do local da rocha de origem, seja por ação da gravidade, das águas ou do vento, e depositaram-se em outro ambiente (SALOMÃO; ANTUNES, 1998). Percebe-se, portanto, a facilidade de serem encontrados, em um mesmo local, solos com características muito distintas.

Segundo Streck et al. (2018), o entendimento do perfil é a primeira etapa na identificação e interpretação das características do solo. Os horizontes pedogenéticos são as camadas de distribuição vertical e paralelas à superfície que podem ser observadas em um perfil de solo, e que diferem entre si pela espessura, cor, textura, estrutura, dentre outras características. Salomão e Antunes (1998) trazem a nomenclatura dos horizontes pedogenéticos, distinguidos pelas letras maiúsculas: O, H, A, E, B, C, F e R.

O mesmo tipo de horizonte pedogenético pode apresentar diferenças de um solo (ou local) para outro (STRECK et al., 2018). Para organizar o conhecimento a respeito dos solos e facilitar o acesso ao grande número de informações disponíveis, são usados sistemas de

classificação de solos, como, por exemplo, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, ou SiBCS (EMBRAPA, 2013). De acordo com o SiBCS, a classificação de um solo é organizada em seis níveis, denominados Níveis Categóricos (NC), cuja explicação encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis Categóricos (NC) do SiBCS

Nível Categórico (NC)	Descrição	Exemplo
1º NC - Ordens	Diferenciação quanto às características que representam processos importantes na formação dos solos	Latossolo, Argissolo, Chernossolo, Neossolo
2º NC - Subordens	Subdivisões das ordens baseadas em características que representam processos secundários na formação dos solos. Importantes para uso agrícola e não agrícola	Latossolo Vermelho, Argilossolo Vermelho, Neossolo Regolítico, Chernossolo Argilúvico
3º NC – Grandes Grupos	Subdivisões das subordens baseadas nas características morfológicas (horizontes), químicas (CTC, saturação de bases, etc.) ou físicas (desenvolvimento de raízes, etc.)	Latossolo Vermelho Distrófico, Argissolo Vermelho Distrófico, Neossolo Regolítico Distrófico, Chernossolo Argilúvico Férrico
4º NC - Subgrupos	Subdivisões dos grandes grupos baseadas em (1) variações em relação aos NCs superiores, (2) características extraordinárias ou (3) típicas	Latossolo Vermelho Distrófico argissólico, Latossolo Vermelho Distrófico húmico, Latossolo Vermelho Distrófico típico
5º NC - Famílias	Subdivisões dos subgrupos baseadas em propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas importantes para o uso e manejo dos solos	-
6º NC - Séries	Subdivisões das famílias baseadas em características relacionadas ao desenvolvimento de plantas ou para fins de engenharia ou geotecnia	-

Fonte: baseado em Streck et al. (2018)

Salomão e Antunes (1998) trazem algumas características de interesse geotécnico dos Latossolos, quais sejam:

- horizonte A com pouca espessura em comparação com o horizonte B;
- horizonte B constituído geotecnicaamente por solo maduro;
- horizonte B apresenta alta porosidade;
- horizonte C é geotecnicaamente denominado solo residual jovem ou solo saprolítico;

- horizonte C apresenta comportamento geotécnico variável em função das características mineralógicas/estruturais das rochas de origem.

De acordo com Streck et al. (2018), no Rio Grande do Sul, os Latossolos foram diferenciados em Latossolos Brunos e Latossolos Vermelhos, conforme a cor predominante no horizonte B. Os Latossolos Brunos são aluminoférricos ($Al \geq 4\text{cmol}_c/\text{kg}$, saturação por $Al \geq 50\%$ e teor de $Fe \geq 18\%$) e alumínicos ($Al \geq 4\text{cmol}_c/\text{kg}$ e saturação por $Al \geq 50\%$), enquanto que os Latossolos Vermelhos são distroférricos (saturação por bases $< 50\%$ e teor de $Fe \geq 18\%$), aluminoférricos ($Al \geq 4\text{cmol}_c/\text{kg}$, saturação por $Al \geq 50\%$ e teor de $Fe \geq 18\%$), distróficos (saturação por bases $< 50\%$) e eutroférricos (saturação por bases $\geq 50\%$ e teor de $Fe \geq 18\%$).

Ferreira et al. (1999) realizaram estudo visando determinar a influência dos minerais da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. Foram utilizadas amostras deformadas e indeformadas da porção superior do horizonte Bw (horizonte B latossólico) de sete Latossolos de Minas Gerais e Espírito Santo, e realizadas análises químicas, físicas e mineralógicas. Os argilo-minerais analisados foram caulinita, gibsitita, goetita e hematita. Observou-se ampla predominância da goetita em relação à hematita, altos teores de gibsitita em algumas amostras e de caulinita em outras.

Os autores perceberam que, dos constituintes mineralógicos, caulinita e gibsitita foram os que melhor se associaram à macroporosidade e à condutividade hidráulica dos Latossolos estudados. Contudo, os relacionamentos foram antagônicos, ou seja, enquanto a presença da gibsitita contribuiu para maior macroporosidade e maior condutividade hidráulica, a presença da caulinita atuou em sentido contrário. Tanto o teor de macroporos quanto o valor de K_s (condutividade hidráulica) mostraram-se diretamente relacionados com o conteúdo de argila dos Latossolos (FERREIRA et al., 1999).

2.2 Biomineralização

Dá-se o nome de biomineralização às alterações químicas de um ambiente devido a atividades microbianas que resultam na precipitação de minerais. É um processo que, em sua ocorrência natural, pode levar à formação de mais de 60 minerais biológicos diferentes, existindo na forma de cristais inorgânicos tanto extracelularmente quanto intracelularmente (ANBU et al., 2016). Materiais biológicos oriundos da biomineralização são compostos, normalmente, de uma fase mineral inorgânica com um biopolímero (ACHAL et al., 2015).

De maneira geral, existem três processos diferentes envolvidos na produção de biominerais: 1 – mineralização controlada biologicamente, que consiste nas atividades celulares

que direcionam especificamente a formação de minerais; 2 – mineralização influenciada biologicamente, processo pelo qual a precipitação mineral passiva é causada pela presença de matéria orgânica da superfície celular; 3 – mineralização induzida biologicamente, modificação química de um ambiente por atividade biológica que resulta em supersaturação e precipitação de minerais (ANBU et al., 2016).

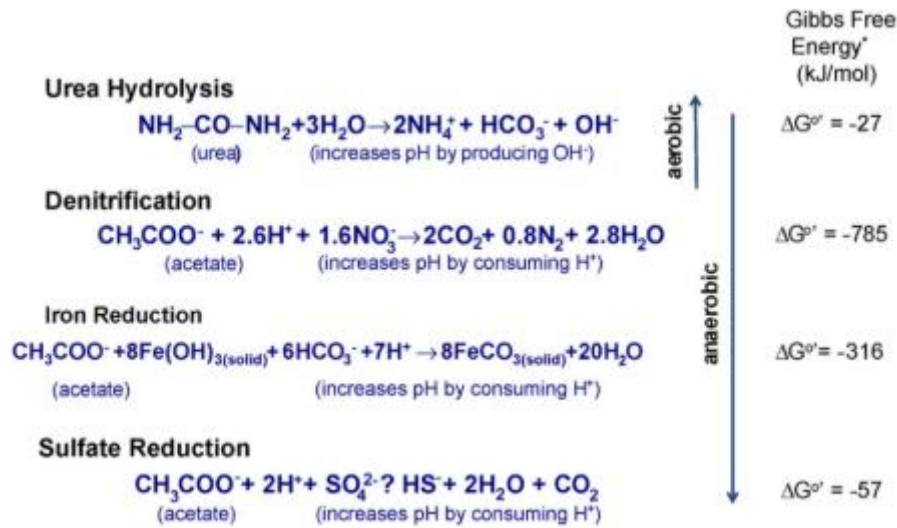
Dentre os materiais biológicos encontrados na natureza, o carbonato de cálcio (CaCO_3) é um dos principais componentes minerais dessas estruturas. Seus polimorfos mais comuns são a calcita, aragonita e vaterita. A calcita e a vaterita são mais populares, sendo a vaterita uma fase menor, metaestável e de transição durante a formação de calcita. A calcita é o polimorfo termodinamicamente mais estável do CaCO_3 e o produto primário do CaCO_3 em muitos processos de biocimentação. Em contraste, a aragonita é o cristal predominante formado pela bactéria *Deleya halophila* (ANBU et al., 2016).

O processo pelo qual o carbonato de cálcio se forma e se deposita na superfície recebe o nome de cimentação, e biocimentação quando o composto é produto de um processo biológico. A biocimentação também recebe o nome de *Microbial Induced Calcite Precipitation* (MICP), processo natural ou artificial de produção de carbonato de cálcio por meio de atividades metabólicas microbianas (ACHAL et al., 2015).

2.2.1 *Microbial Induced Calcite Precipitation* (MICP)

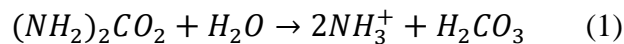
A *Microbial Induced Calcite Precipitation* (MICP), ou biocimentação, é um processo bioquímico de precipitação de carbonato de cálcio realizado por microrganismos e que, assim como os demais mecanismos de biomineralização, pode ocorrer de forma controlada ou induzida. Existe uma ampla gama de bactérias capazes de sintetizar o carbonato de cálcio em diversos ambientes e condições (DE MUYNCK et al., 2010). Da mesma maneira, são 4 os principais mecanismos de precipitação utilizados: via hidrólise da ureia, por desnitrificação, redução férrica e redução de sulfato (WANG et al., 2017), processos representados na Figura 1.

Figura 1 - Mecanismos de precipitação de carbonato de cálcio

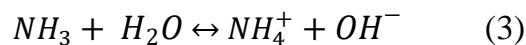
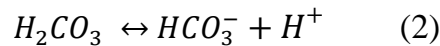


Fonte: DEJONG et al., 2010

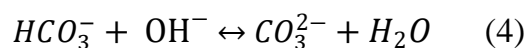
O processo mais utilizado na MICP é por meio da hidrólise da ureia, realizado, normalmente, por bactérias produtoras de urease, que sintetizam a ureia em presença de gás carbônico e íons cálcio gerando carbonato de cálcio, também chamado biocimento (DE MUYNCK et al., 2010). Segundo Krajewska (2018), entre o início e o fim do processo, 5 reações químicas são envolvidas. Inicialmente, a ureia na presença de água é sintetizada pela enzima e transformada em ácido carbônico e amônia (Equação 1).



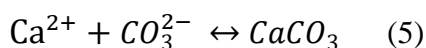
Os dois produtos se dissociam em água dando origem aos íons bicarbonato, amônio e hidróxido (Equação 2 e Equação 3).



A produção dos íons hidróxido aumenta o pH do meio, levando à formação de íons carbonato (Equação 4).

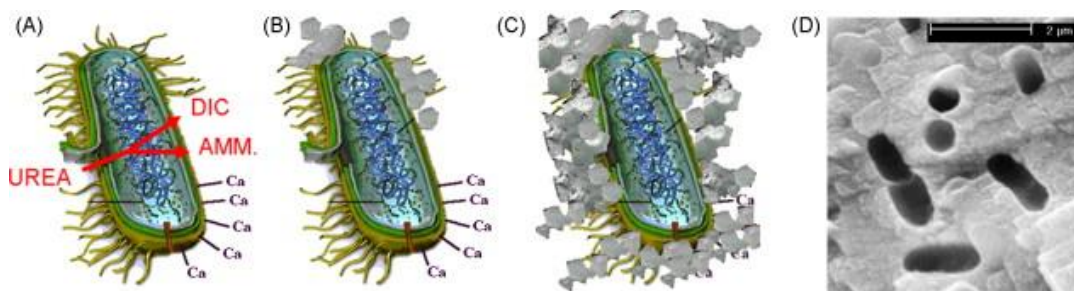


Na presença de Ca^{2+} , ocorre a combinação de íons e a precipitação do carbonato de cálcio (Equação 5).



Apenas alguns dos microrganismos com capacidade de induzir a precipitação de CaCO_3 podem produzir enzima urease e não são patogênicos (OMOREGIE et al., 2017). Dentre os organismos capazes de sintetizar a urease, as bactérias ureolíticas apresentam os melhores resultados, devido ao curto tempo necessário para precipitar CaCO_3 , e às grandes massas de CaCO_3 precipitadas (MOUNTASSIR et al., 2018). As bactérias usam o nutriente para cultivar células, a ureia como substrato para hidrolisar e o cálcio como fonte de energia para formar o biomineral (ACHAL et al., 2015). A representação da ocorrência da biocimentação pode ser conferida na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de precipitação de carbonato de cálcio pelas células bacterianas



Fonte: DE MUYNCK et al., 2010

As bactérias do grupo *Bacillus*, como a *Bacillus pasteurii*, posteriormente denominada *Sporosarcina pasteurii* (*S. Pasteurii*), são as mais utilizadas nas técnicas de biocimentação (ACHAL et al., 2015). Segundo Umar et al. (2016), a atividades das bactérias produtoras de urease pode ser dividida em duas classes, conforme a resposta à concentração de amônio no meio. Alguns microrganismos têm sua atividade reprimida por altas concentrações de amônio, portanto, a utilização de microrganismos que não têm sua atividade reprimida, como a *S. Pasteurii*, é preferível para os processos biomediados, já que altas concentrações de ureia são hidrolisadas no processo.

Embora a MICP possa ocorrer de forma controlada ou induzida, a produção de carbonato de cálcio por bactérias é geralmente considerada como induzida, pois o tipo de mineral produzido é amplamente dependente das condições ambientais (DE MUYNCK et al., 2010). Segundo Keykha et al. (2017), são 3 os fatores que afetam a MICP: a concentração de células bacterianas, o pH e a temperatura. Já Anbu et al. (2016) traz, além dos fatores já citados,

o tipo de bactéria, a concentração de ureia e a concentração de íons cálcio como variáveis preponderantes.

2.2.2 Fatores que influenciam a MICP

Diversos autores investigaram a influência de inúmeras variáveis na biocimentação, e há divergências quanto à definição dos fatores mais importantes. Segundo Sharaky et al. (2018), os fatores físicos, químicos e biológicos que influenciam o transporte de bactérias e que têm sido investigados são: propriedades fluídas como regime de fluxo; temperatura; salinidade; umidade; pH; volume total de nutrientes disponíveis injetados; características da parede celular tais como número de bactérias presentes, atividade metabólica de células bacterianas, forma celular, dimensão, arranjo, hidrofobicidade, carga elétrica de superfície; propriedades sólidas, como distribuição de tamanho de grãos; propriedades de meios porosos, textura superficial e mineralogia. Nesta revisão, serão abordadas a influência do uso das bactérias ou uso da enzima, temperatura, pH e concentração da solução biocimentante.

2.2.2.1 Uso de bactérias ureolíticas ou a enzima urease livre

Hoang et al. (2018) realizou estudo comparando a atividade da enzima urease isolada, denominada *Bacterial Enzyme Induced Calcite Precipitation* (BEICP), com a MICP tradicional. A técnica BEICP parece oferecer um meio melhorado de bioestabilização de solos em comparação com o processo de MICP, incluindo melhorias ambientais, geotécnicas e de biossegurança. Como resultados, os autores constataram taxas mais altas de atividade da enzima urease livre, uma variedade maior de aplicações para a precipitação através da BEICP, e uma maior eficiência na diminuição da permeabilidade do solo tratado com a enzima isolada.

Krajewska (2018) destaca as vantagens da utilização da enzima em detrimento da aplicação da bactéria *Sporosarcina pasteurii*. Pelo fato de não haver crescimento e armazenamento de bactérias, o processo enzimático é mais direto, além de ser mais barato e simples, se utilizadas as enzimas extraídas de fontes vegetais, especialmente o feijão de porco, ou *Canavalia ensiformis*. Também vale ressaltar que, embora de alto custo, a enzima isolada encontra-se disponível comercialmente.

Uma das principais diferenças entre MICP e BEICP é o tamanho das moléculas envolvidas no processo. Enquanto as células das bactérias possuem diâmetro maior que 1µm, o diâmetro das enzimas gira em torno de 10nm. Além disso, as células bacterianas possuem

maior dificuldade de movimento em relação às enzimas (JIANG ET AL., 2016). O pequeno tamanho das partículas enzimáticas permite uma maior penetração nos vazios do solo (KRAJEWSKA, 2018), o que torna a técnica BEICP mais indicada na estabilização de solos finos, como os argilosos.

Outro fator importante a ser ressaltado é a diferença entre a atividade da bactéria e da enzima livre. Na biocimentação enzimática, observam-se maiores quantidades de CaCO_3 precipitado em comparação com os resultados correspondentes da bactéria, o que pode ser explicado devido à inibição da atividade bacteriana em presença de alta concentração de ureia ou cloreto de cálcio. A existência da membrana celular bacteriana limita a quantidade de nutrientes transportados pela célula ou provoca, por vezes, o seu rompimento, o que também contribui para o nível de atividade mais baixo (KRAJEWSKA, 2018).

Jiang et al. (2016) realizou estudo comparando a formação de CaCO_3 entre a enzima urease livre e a bactéria *Bacillus megaterium* (*B. megaterium*), em condições aeróbias e anaeróbias. Como conclusões, foi constatado que a atividade ureolítica da enzima foi superior à da bactéria, da mesma maneira que para os estudos anteriores. Essa diferença foi atribuída à maior concentração da enzima ativa em sistema aquoso, visto que o ambiente de reação e a concentração de ureia são os mesmos.

2.2.2.2 Temperatura

A temperatura é um fator cuja influência na MICP é de difícil mensuração, visto que afeta o crescimento microbiano, a atividade da urease e a solubilidade do CaCO_3 (KIM et al., 2018). Baixas temperaturas diminuem a taxa de reprodução bacteriana, reduzindo a urease presente na solução de reação, bem como a atividade enzimática, afetando a precipitação de calcita (SUN et al., 2018).

Kim et al. (2018) estudaram o efeito das variáveis temperatura, pH e duração da reação na resposta da biocimentação utilizando dois microrganismos distintos, o *Staphylococcus saprophyticus*, organismo isolado da areia calcária, e a *S. pasteurii*, comumente utilizada nesse bioprocesso. A eficiência da MICP, determinada por meio da quantidade de calcita precipitada no final do procedimento, foi maior para a temperatura de 30°C em comparação com a de 50°C, sendo os resultados obtidos pelo *S. saprophyticus* 5 vezes maiores que os da *S. pasteurii*, sob condições idênticas. Ambos os microrganismos demonstraram ser muito sensíveis à variação de temperatura, apresentando uma queda de cerca de 60% dos resultados com o aumento de 30°C para 50°C.

Sun et al. (2018) realizou experimento semelhante comparando a *B. megaterium* com a *S. pasteurii* em relação à atividade bacteriana, atividade enzimática e eficiência da precipitação de calcita em baixas temperaturas. Percebe-se a evidente melhora da atividade enzimática da *S. pasteurii* com o aumento da temperatura, enquanto que a *B. megaterium* sofreu pouca alteração. Para 30°C, a *S. pasteurii* teve atividade enzimática superior à da *B. megaterium*, ao contrário do observado para 15°C. Da mesma maneira, as quantidades de carbonato de cálcio precipitadas em baixa temperatura foram maiores para a *B. megaterium*, e para altas temperaturas foram maiores para a *S. pasteurii*.

2.2.2.3 pH

De acordo com Mujah et al. (2016), na biocimentação do solo, a variação dos valores de pH pode influenciar o transporte e a adesão das bactérias, um fator importante que afeta a distribuição homogênea da precipitação dos cristais de CaCO_3 . Um estudo preliminar realizado por Cheng et al. (2014) apontou que a relação entre o pH inicial do solo e a formação de cristais de carbonato de cálcio é uma função da variação de solubilidade do CaCO_3 como resultado dos diferentes valores iniciais de pH.

É conhecido entre os pesquisadores que o ambiente alcalino é o mais favorável ao processo. A enzima urease possui atividade ótima em uma faixa bem específica de pH, entre 7 e 8, variando conforme o tipo de microrganismo utilizado. A *Sporosarcina pasteurii* possui atividade ótima com valor de pH igual a 8, semelhante à *Bacillus sphaericus*, enquanto que a *Bacillus megaterium* tem sua taxa de atividade máxima observada para pH igual a 7. A formação dos íons hidróxido (OH^-) promove o aumento do pH do ambiente durante a ocorrência da reação, o que altera as condições ideais do meio para a precipitação (KIM et al., 2018).

2.2.2.4 Concentração da solução biocimentante

A concentração da solução de cimentação influencia na formação de cristais de carbonato de cálcio, conforme foi estudado por alguns pesquisadores. Al Qabany et al. (2012), ao compararem o efeito de duas concentrações distintas (0,25M e 0,50M) na precipitação de CaCO_3 , concluíram que a concentração mais baixa resulta em uma distribuição mais uniforme da calcita nos corpos de prova., já que promove uma precipitação mais lenta. Os cristais foram distribuídos por todos os grãos do solo, onde não foram encontradas áreas de precipitação

concentrada, pois esta parecia ocorrer sobre a superfície dos grãos de areia, em vez de se acumular sobre os cristais.

Segundo Mujah et al. (2016), a distribuição mais homogênea dos cristais de CaCO_3 ao longo da matriz de areia é geralmente observada em menor concentração da solução de cimentação. Enquanto isso, os cristais de calcita formados em concentrações mais elevadas da solução biocimentante se depositam aleatoriamente nos vazios do solo, pois a alta concentração promove uma precipitação mais rápida. Al Qabany et al. (2012) conclui, portanto, que a concentração do meio líquido influencia no padrão de precipitação de CaCO_3 , na escala de poros.

Além de afetar a distribuição do carbonato de cálcio precipitado, a concentração da solução também influencia na eficiência da MICP. Ng et al. (2014) alegaram que o solo tratado com reagente de cimentação 0,5M era mais resistente que o tratado com reagente de cimentação 1M. A menor concentração levou a uma formação mais homogênea dos cristais de CaCO_3 nos pontos de contato das partículas, o que contribuiu para o aprimoramento da força com menor perturbação do solo e redução da permeabilidade.

2.2.3 Aplicações da MICP na engenharia geotécnica

A indústria da construção civil responde por metade do uso global de recursos, até 40% do consumo de energia e até 20% da emissão de gases de efeito estufa (ACHAL et al., 2015). Para se tornar sustentável, a indústria da construção deve gerenciar seu impacto ambiental (materiais e uso de energia); preocupações sociais (saúde e bem-estar) e passivos econômicos (custo de construção) da melhor maneira possível. Assim, a mudança nos materiais de construção é imperativa para garantir a sustentabilidade (ACHAL; MUKHERJEE, 2015).

A descoberta dos bioprocessos e o potencial de aplicação na engenharia civil levou ao desenvolvimento de diversos estudos investigando a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de materiais de construção melhorados biotecnologicamente. Abo-El-Enein et al. (2013), por exemplo, constatou o crescimento de cerca de 33% da resistência à compressão de argamassas de areia e cimento biocimentadas, em comparação com as que não foram submetidas à biocimentação.

Sánchez et al. (2018) traz a MICP aplicada na produção e proteção de materiais à base de cimento empregados para reparo preventivo do concreto. Como resultado, o tratamento de biodeposição levou a uma maior resistência ao congelamento/descongelamento, maior resistência superficial e menor permeabilidade. Achal e Mukherjee (2015) incorporaram

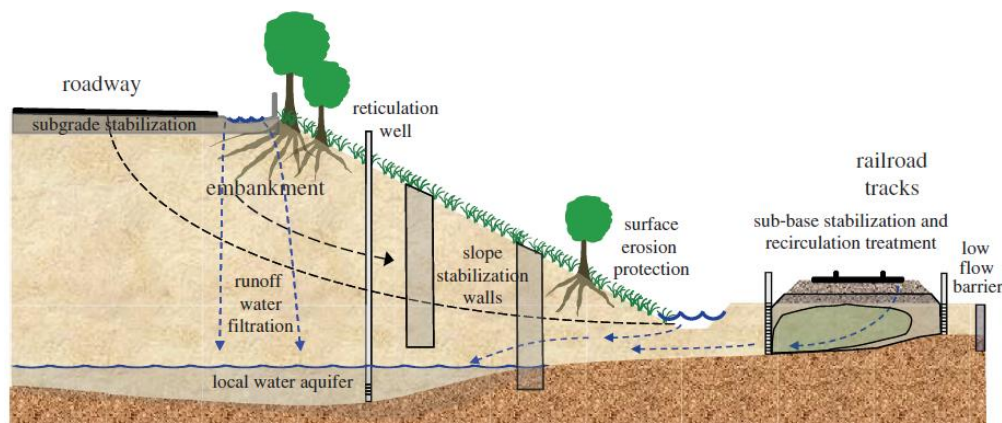
biocimento ao concreto e observaram um crescimento de cerca de 18% na resistência à compressão das amostras biocimentadas.

Porém, foi em solos que a MICP encontrou seu principal nicho de aplicação. De acordo com Terzis e Laloui (2019), a prática da engenharia geotécnica ignorava a presença de microrganismos e sua função bioquímica nos solos até aproximadamente 10 anos atrás. A descoberta da MICP tende a promover uma revolução no tratamento de problemas geotécnicos comuns, como a erosão, deslizamentos e liquefação de solos, ao propor soluções sustentáveis e não convencionais para essas situações. Chu et al. (2015) afirma que a tecnologia é sustentável porque os microrganismos existem abundantemente na natureza e podem ser reproduzidos a baixos custos.

Segundo Umar et al. (2016), a biocimentação tem sido considerada uma nova e inventiva abordagem em engenharia geotécnica, atuando, principalmente, na estabilização de solos devido a sua capacidade de melhorar a resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento e a rigidez desses materiais, especialmente os solos granulares (MOUNTASSIR et al., 2018). O carbonato de cálcio acumula entre os grãos de solo, preenchendo os vazios e reduzindo, assim, a permeabilidade, ao passo em que contribui para o aumento da resistência por promover uma ligação física entre as partículas (CARDOSO et al., 2018).

DeJong et al. (2010) faz uma abordagem multifuncional sobre as aplicações da biocimentação na engenharia geotécnica, que pode ser ilustrada por meio da Figura 3. Conforme visualizado, a técnica pode servir para estabilização de bases e sub-bases de pavimentos, mitigação da erosão nas superfícies de taludes, mitigação da liquefação em maciços de solo, auxilia na estabilização de superfícies inclinadas por meio da formação de colunas rígidas obtidas da injeção de solução cimentante, entre outras possibilidades.

Figura 3 - Soluções geotécnicas que fazem uso da MICP



Fonte: DeJong et al. (2010)

Dependendo da quantidade final desejada de CaCO_3 , os tempos de reação da biocimentação variam desde várias horas a alguns dias, tornando a técnica viável para aplicações modernas em engenharia. Pela baixa viscosidade e boa trabalhabilidade das soluções bacterianas, a MICP não requer muita energia nas aplicações *in situ*, reduzindo os custos gerais de aplicação. Quanto mais poroso for o solo, menos pressão de injeção é necessária e também é menor o número de injeções para promover a infiltração desejada (TERZIS; LALOUI, 2019).

De acordo com Terzis e Laloui (2019), o nível de melhoria das propriedades do solo pode ser determinado e controlado conforme a aplicação prevista para o material geotécnico, por meio do controle dos fatores que influenciam o processo, como concentração da solução, pH do meio, temperatura, entre outros. Da mesma maneira, pode-se obter materiais com resistência e rigidez próximas às do concreto típico, gerando soluções voltadas para fins estruturais. Os autores destacam as maiores vantagens da técnica como sendo a adaptabilidade e a flexibilidade de aplicação, definidas conforme o objetivo final.

2.2.3.1 Mitigação da liquefação

Segundo Chu et al. (2015), a liquefação do solo normalmente ocorre em solos arenosos saturados durante terremotos. Estes solos geralmente consistem em solos não coesos, soltos e saturados, com resistência ao cisalhamento insuficiente para a carga em que estão sendo solicitados (MONTROYA et al., 2013). A principal causa de liquefação é a perda de resistência ao cisalhamento devido ao aumento da pressão da água nos poros, o que reduz a tensão efetiva do solo (BAO et al., 2019). Uma vez que neste estado transitório o solo se comporta como fluido, a liquefação é uma relevante causa de danos das estruturas e infraestruturas durante os abalos sísmicos. As medidas mitigadoras da liquefação normalmente incluem as que modificam a densidade do solo (compactação), a composição do solo (adição de finos ou cimentação), os padrões de fluxo de água (drenagem) ou o grau de saturação do solo (saturação parcial induzida) (XIAO et al., 2018).

Montoya et al. (2013) realizou estudos comparando o comportamento do solo tratado com biocimentação com as respostas obtidas do solo não tratado. Ensaios de centrifugação foram usados para avaliar e estabelecer o potencial do tratamento com MICP para aumentar a resistência ao desencadeamento da liquefação e reduzir as consequências caso ela ocorra. Foram utilizados variados níveis de tratamento, desde níveis de cimentação leve a pesados, determinados por meio da velocidade da onda de cisalhamento. Para avaliar a resposta do solo

tratado, foram analisados os parâmetros da integridade da cimentação, geração de pressão nos poros e sua distribuição no solo.

Os autores utilizaram as bactérias *Sporosarcina Pasteurii* em solução percolada nos corpos de prova. A percolação foi usada como método de tratamento porque os testes laboratoriais preliminares descobriram que o fluxo de tratamento através de solo drenado resultou em uniformidade similar ou melhorada da distribuição de cimentação em comparação com os espécimes que foram submetidos ao método de injeção tradicional.

Como resultado, o tratamento com MICP aumentou a força cíclica e a rigidez da areia e proporcionou melhoria suficiente para resistir à liquefação. Sob carga dinâmica, os solos tratados com MICP mostraram redução da geração de excesso de pressão de poros em todos os níveis de agitação e assentamentos reduzidos. Assentamentos induzidos por agitação também foram menores do que aqueles observados no modelo de areia solta sem tratamento. Os assentamentos dos solos tratados com MICP eram semelhantes ou menores do que os da areia densa e não tratada até a cimentação começar a degradar, ponto em que os assentamentos eram maiores que os da areia densa, mas ainda mais baixos que os da areia solta (MONTROYA et al., 2013).

Ainda conforme Montoya et al. (2013), os resultados dos testes de centrifugação ilustram que o tratamento com MICP melhora o comportamento do solo sob carregamento, reduzindo as poropressões geradas e assentamentos induzidos por agitação. Os autores concluem que a técnica MICP oferece uma alternativa de melhoria do solo para reduzir a suscetibilidade à liquefação e o dano associado ao carregamento dinâmico.

Segundo Bao et al. (2019), apesar do MICP ser um método eficiente, livre de poluição e ambientalmente sustentável de mitigação da liquefação de solos, a condutividade da solução microbiana é afetada devido à redução da permeabilidade do solo durante o processo. Com isso, a transferência de microrganismos pode não ocorrer de maneira homogênea, o que interfere na obtenção de resultados.

2.2.3.2 Controle de erosão

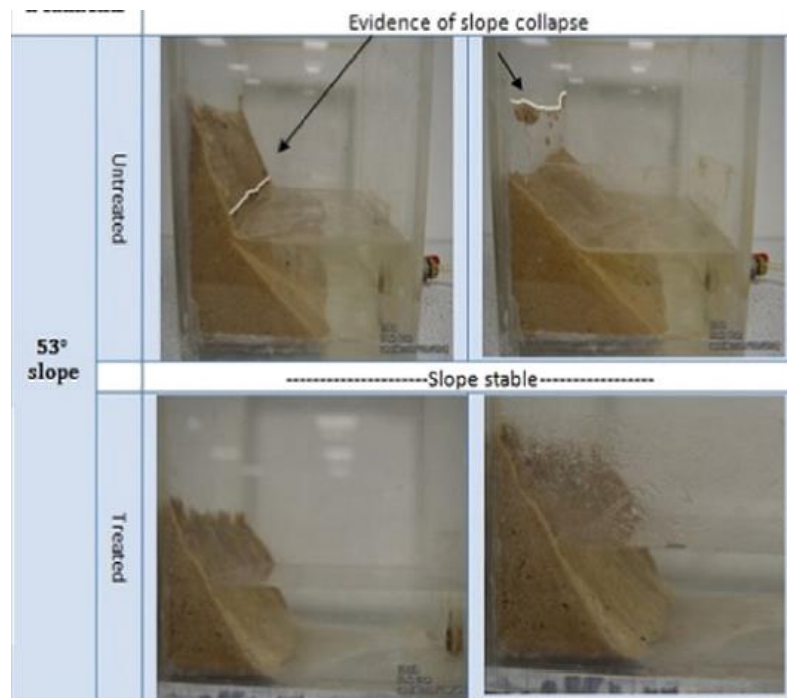
Mountassir et al. (2018) afirmam que a MICP via ureólise tem sido investigada como um método para reduzir a erosão por criar uma camada mais densa de CaCO_3 na superfície do solo que é mais resistente às tensões de cisalhamento impostas pelo vento ou pela água, protegendo o solo subjacente. Segundo os autores, estudos também demonstraram o potencial do MICP via ureólise para reduzir a erosão induzida pela água, inclusive para aterros e encostas

em ambientes ribeirinhos e costeiros e como meio de mitigação contra a erosão em torno dos elementos estruturais de pontes, como pilares.

Para a estabilidade e controle de erosão de superfícies inclinadas de solo, é necessário tratar somente a camada superior do maciço (IVANOV; CHU, 2008). Salifu et al. (2016) estudaram a eficácia da MICP na estabilização de encostas e mitigação da erosão em encostas marítimas, analisando os efeitos da intermitência das correntes de maré em solo tratado com biocimentação. Para tanto, os autores utilizaram protótipos de dimensões reduzidas visando simular taludes com diferentes inclinações, e os submetteram à ação da água através de ondas.

Como resultado, Salifu et al. (2016) constataram que os protótipos que receberam o tratamento via MICP apresentaram-se estáveis ao final do experimento, ao contrário dos modelos com o solo natural sem tratamento. A Figura 4 demonstra as diferenças entre os protótipos tratados e não tratados, na inclinação de 53°, após a realização do experimento. Os solos tratados com MICP foram significativamente melhorados em comparação com um não tratado submetido ao mesmo ciclo de ondas, quando avaliados em relação à sua estabilidade e erosão.

Figura 4 - Diferenças entre os taludes tratados e não tratados sob ação da água



Fonte: adaptado de Salifu et al., 2016

Jiang et al. (2014) estudaram os efeitos da MICP na mitigação da ocorrência de erosão interna no solo, também denominada *piping*. Como objeto de estudo teve-se uma mistura de

areia e caulim, rocha de granulometria fina constituída de material argiloso, e formada por grupos de silicatos hidratados de alumínio, principalmente a caulinita e a haloisita. Foram testadas, para efeito de comparação, amostras tratadas com a bactéria *Sporosarcina Pasteurii* e solução cimentante, e amostras controle, sem tratamento.

Todas as amostras foram submetidas a fluxos de infiltração e foram avaliadas quanto às evoluções de condutividade hidráulica, concentração de caulim no efluente e a massa total erodida, em função do gradiente hidráulico e da tensão de cisalhamento. Os resultados confirmaram que, nas amostras tratadas com MICP, tanto o gradiente hidráulico crítico como a tensão de cisalhamento aumentaram, enquanto a massa erodida diminuiu, sob as mesmas condições hidráulicas (JIANG et al., 2014).

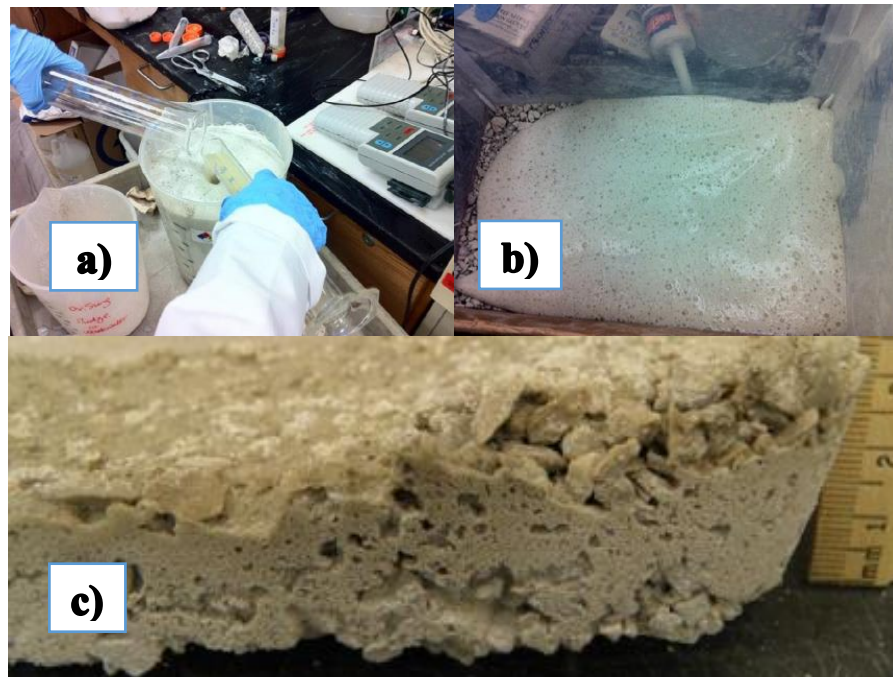
Os autores atribuem os resultados ao fato da precipitação da calcita preencher os poros existentes entre as partículas do solo, gerando uma obstrução local e formando um biofilme ao longo das amostras. Dessa maneira, este novo tecido formado, menos permeável, atrasa a formação de caminhos de fluxo e o rearranjo das partículas grossas da areia. A massa de erosão também sofre redução porque o tecido menos permeável restringe a mobilização de partículas de caulim no solo, cuja medição no efluente hidráulico indica a quantidade de material erodido.

2.2.3.3 Construção ou reparação de estradas

A biocimentação também pode ser utilizada para construção ou reparo de estradas, de maneira semelhante à argamassa de cimento. Chu et al. (2015) estudaram a aplicação da MICP utilizando como base da solução cimentante uma mistura de finos de calcário, um resíduo da indústria de calcário, e espigas de milho. Da mesma maneira, qualquer outro subproduto agrícola pode ser usado no lugar das espigas de milho para produção de sais de cálcio solúveis por meio de um processo de fermentação acidogênico.

À solução de cálcio solúvel foram adicionadas a suspensão bacteriana e a ureia, formando a solução biocimentante. O produto obtido pode ser aplicado diretamente no topo do solo ou sobre uma camada de pedra britada, que podem constituir tanto a camada de base quanto de sub-base do pavimento. Após o período de secagem da solução, uma placa rígida é formada e o pavimento pode receber o revestimento final. A Figura 5 apresenta a sequência de execução da MICP relatada por Chu et al. (2015).

Figura 5 - Sequência executiva da MICP para aplicação em bases de pavimentos: a) mistura dos finos de calcário, resíduos de milho, solução bacteriana e ureia; b) aplicação da mistura sobre camada de brita graduada; c) aspecto final da camada do pavimento tratada com MICP



Fonte: adaptado de Chu et al., 2015

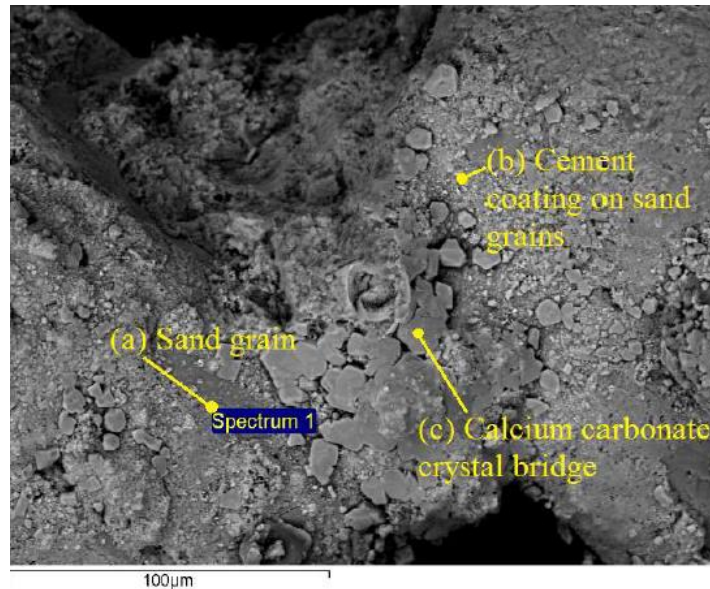
Porter et al. (2016) testaram a eficiência da MICP na estabilização de bases de rodovias australianas. A proposta dos autores consistia em reduzir a quantidade de cimento necessária para a estabilização da camada de base, fazendo uso, para isso, da biocimentação. Amostras de areia com uma dosagem de cimento de 7% receberam a precipitação microbiana e foram analisadas quanto à resistência à compressão confinada. DIC (digital image correlation) foi utilizada durante o teste de resistência para monitoramento de informações a respeito de deformações locais e acúmulo de tensões.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostraram uma melhora na resistência do sistema MICP e cimento combinados maior do que o aumento de força obtido através somente do MICP ou da estabilização somente com cimento. A resistência à compressão da amostra tratada com MICP e cimentação foi cerca de 40% superior em relação à amostra estabilizada com cimento. Micrografias da estrutura granular obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram o cimento revestindo uniformemente os grãos do solo e os cristais de carbonato precipitados nas pontes entre as partículas, conforme ilustrado na Figura 6 (PORTER et al., 2016).

Os autores também constataram que a pré-estabilização com um ligante cimentício aumenta a precipitação de carbonatos em pontes intergranulares e, com isso, uma pequena quantidade de cristais de carbonato de cálcio melhora a resistência do solo consideravelmente.

Isso ficou evidente através dos resultados combinados dos testes de força, microscopia eletrônica de varredura e DIC.

Figura 6 - MEV do solo tratado com cimentação e MICP



Fonte: adaptado de Porter et al., 2017

Em outro estudo, Porter et al. (2017) testaram o fortalecimento do solo *in situ*, em escala real, com o fluido biológico sendo injetado no solo. Observa-se que a técnica funciona bem para tratamentos de superfície de materiais granulares, mas possui limitações em relação à aplicação em materiais finos, pois há o entupimento muito rápido da injeção da solução. Os autores verificaram que a pressão ideal para evitar o entupimento é a fornecida por uma vazão de injeção de cerca de 350mL/h, que evita a obstrução de um tubo de 5m de comprimento.

2.2.4 A MICP e os solos argilosos

A grande maioria dos estudos de biocimentação em geotecnia considerou a aplicação da técnica em solos arenosos, ou seja, de grãos grossos e com grande porosidade. Como a permeabilidade do solo grosseiro é alta, é possível que as bactérias passem por ele. No entanto, em solos de grãos finos e baixa permeabilidade, o transporte de bactérias torna-se difícil (KEYKHA et al., 2014). Cardoso et al. (2018) afirmam que os poucos estudos existentes utilizaram solos com porcentagens controladas de argila de até 20%. Rebata-Landa (2007) sugeriu que a faixa ideal de tamanho de grão para a ocorrência do processo de

biocimentação é de 50 a 400 µm, pois a atividade bacteriana encontra dificuldades de ocorrência em solos muito finos.

Ivanov et al. (2015) afirma que o efeito do carbonato de cálcio na biocimentação da argila ainda não foi bem compreendido. Portanto, o estudo da MICP nas argilas ainda é realizado com base em tentativa e erro. Buscando reunir os trabalhos que envolvem o uso de solo argiloso ou solos com grandes quantidades de finos submetidos à biocimentação, foi elaborado o Quadro 1, que relaciona o tipo de solo estudado com as bactérias utilizadas, método de aplicação e duração do tratamento.

Quadro 1 - Estudos envolvendo biocimentação e solos finos

Bactéria	Solo	Método	Duração	Referência
<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Areia (índice de vazios 0,895) e mistura de areia e argila (índice de vazios 0,34)	Bioaumentação – 1 aplicação. Submersão dos corpos de prova na solução de alimentação	21 dias	Cardoso et al. (2018)
<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Argiloso	Bioaumentação. Mistura ao solo junto com a água de compactação, e cura em câmara úmida	7 dias	Morales et al. (2019)
<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Solo 1 (47,1% areia e 53,6% finos); Solo 2 (17,48% areia e 82,28% finos)	Bioaumentação. Mistura ao solo em substituição à água de compactação, e cura ao ambiente ou em câmara úmida	0, 3 e 7 dias	Sharma e Ramkrishnan (2016)
<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Argila siltosa	Bioaumentação. Mistura ao solo em substituição à água de compactação, e cura ao ambiente ou em câmara úmida	7 e 14 dias	Keykha et al. (2017)
<i>Bacillus Megaterium</i>	Solo siltoso residual (38% de areia e 62% de finos)	Bioaumentação. Mistura das bactérias ao solo em substituição à água de compactação, e injeção da solução biocimentante	De 24h a 72h	Lee Lee et al. (2013)
<i>Bacillus subtilis</i>	Argiloso	Bioaumentação. Mistura das bactérias ao solo juntamente com a água de compactação	Cura de 3, 7, 14 e 28 dias	Hasriana et al. (2018)
-	Argila areno-siltosa	Bioestimulação. Mistura da solução nutriente em substituição à água de compactação	Cura de 7, 15, 30, 45, 70 e 90 dias	Muñetón (2013)
<i>Sporosarcina Pasteurii</i>	Areia e mistura de areia e argila caulínica em 2,5%, 5% e 7,5% em massa	Bioaumentação. Injeção da cultura de bactérias e após 2h injeção da solução biocimentante	12 dias	Sun et al. (2019)

Dentre os autores que utilizaram a MICP para melhoria das propriedades de solos argilosos, Sun et al. (2019) realizou estudo buscando identificar uma interação química entre os minerais de argila e os microrganismos do solo e sua atividade enzimática, concluindo que a caulinita presente no material exercia um efeito inibitório da taxa metabólica das enzimas.

Lee Lee et al. (2013) estudou a aplicação da MICP em um solo residual cuja composição granulométrica é de 38% areia, 43% silte e 19% argila. Foram analisados o teor de calcita precipitada, a resistência à compressão não confinada e o módulo de elasticidade do solo biocimentado. Como resultado, o teor de calcita variou entre 1,36% e 2,64%, valores geralmente inferiores aos alcançados em outros estudos, como o de Whiffin et al. (2007), que atingiu 3,5% de calcita em solo arenoso fino, e Ng et al. (2013), com teores de calcita chegando aos 6,4% para areia grossa.

As comparações permitiram Lee Lee et al. (2013) concluir que, quanto maiores as partículas do solo, maior a quantidade de calcita precipitada. Isso ocorre porque bactérias e reagentes de cimentação podem fluir facilmente através de um meio poroso do solo para promover uma maior precipitação de calcita. No entanto, mesmo com menor teor de calcita, Ng et al. (2013) descobriram que a melhoria das propriedades de engenharia de solos residuais foi comparável aos materiais mais grossos devido aos pontos de contato partícula-partícula serem mais elevados neste tipo de solo.

Sharma e Ramkrishnan (2016) realizaram a biocimentação em 2 tipos de solo: o solo 1 com areia 47,1%, lodo+argila 53,6% e cascalho 0,3%; e o solo 2 com areia 17,48%, lodo+argila 82,28% e cascalho 0,24%. Ambos os solos foram submetidos ao mesmo tratamento com a solução biocimentante e foram ensaiados à compressão não confinada para determinação da eficiência da biocimentação. Foram variadas, no experimento, a concentração da solução bacteriana (1×10^5 , 1×10^6 e 1×10^7 ufc/mL), a concentração do reagente de cimentação (0,25M, 0,5M, 0,75M e 1,0M) e a duração do tratamento (0, 3 e 7 dias). A Tabela 2 apresenta as condições ideais para a obtenção da maior taxa de incremento de resistência para cada tipo de solo.

Observou-se que a MICP aumenta a resistência à compressão não confinada de ambos os solos, embora o incremento de resistência tenha sido maior no solo 1 do que no solo 2. A diferença pode ser atribuída ao tamanho distinto dos poros de cada material que, no caso do solo 1, se aproxima mais do tamanho ideal para o movimento dos microrganismos, que varia de 0,5 a 3,0 μm , segundo Al Qabanny et al. (2012).

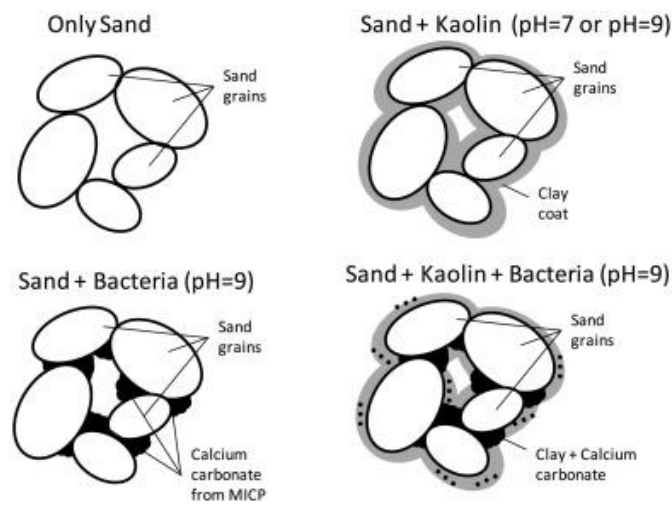
Tabela 2 - Condições ótimas e incremento da resistência à compressão dos solos

Tipo de solo	Solo 1 (CI)	Solo 2 (CH)
Concentração ótima da solução bacteriana (ufc/mL)	1×10^7	1×10^6
Concentração ótima do reagente cimentante (M)	0,5	0,5
Crescimento da resistência à compressão simples 0-7 dias (kg/cm ²)	2,40 – 3,45 (43,75%)	1,71 – 2,18 (27,49%)

Fonte: adaptado de Sharma e Ramkrishnan (2016)

Cardoso et al. (2018), em um dos trabalhos mais relevantes sobre biocimentação em argilas, investigou a interação química entre a solução de alimentação e os solos argilosos, visto que os minerais de argila reagem com o fluido percolante. Para tanto, comparou amostras de areia biocimentadas com amostras da mesma areia à qual foi adicionada uma determinada quantidade de argila (caulim), também submetidas à biocimentação, em esquema ilustrativo na Figura 7. O objetivo era avaliar a influência dos minerais argilosos na formação do biocimento.

Figura 7 - Comportamento da areia e da mistura de areia e caulim, no estado natural e biocimentado



Fonte: Cardoso et al. (2018)

A quantidade de argila adicionada totalizou 28% de material fino na composição final da mistura, quantidade suficiente para reduzir a porosidade de 0,895 (areia) para 0,34 (areia-caulim). Ambas as amostras foram submetidas às mesmas condições de tratamento da MICP através de percolação da solução biocimentante nos corpos de prova. Porém, a fim de analisar os efeitos da sucção osmótica nas misturas areia-caulim, algumas amostras foram submersas em água destilada e na solução de alimentação, enquanto outras foram submersas apenas na solução de alimentação (CARDOSO et al., 2018).

Os autores realizaram testes de compressibilidade e de resistência à tração, além de análises MEV. Não foram observadas alterações significativas na compressibilidade da areia submetida à biocimentação, fato atribuído à quebra das ligações de calcita durante o carregamento. Já as alterações nos índices de compressibilidade das misturas areia-caulim apontaram para a maior influência dos efeitos osmóticos da argila nos resultados do que a própria biocimentação. Os testes de tração confirmaram a influência da sucção osmótica no crescimento da resistência à tração (cerca de 28% do incremento), mas também concluíram que a atividade bacteriana contribuiu para a alteração nos resultados (em torno de 16,5% do incremento).

Morales et al. (2019) realizaram, até então, o estudo mais completo a respeito da aplicação da MICP em solos argilosos. Os autores investigaram os efeitos da biocimentação em filitos de argila bruta compostos por moscovita/ilita 20%, clorito 15%, ilstrito-smectita ou ilite-clorito 10%, quartzo 35%, dolomita 5% e óxido de ferro 5%. Trata-se, portanto, de um material com mistura de minerais de argila e “areia de quartzo” na proporção 1:1, desconsiderando as pequenas porcentagens de dolomita e óxido de ferro. Foram realizados testes de granulometria, limites de Atterberg, compactação Proctor, CBR, cisalhamento direto, permeabilidade e porosidade. As amostras ensaiadas foram denominadas B-4 (argila) e BT-4 (argila biocimentada). Os resultados foram compilados e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios realizados por Morales et al. (2019)

Amostra		B-4	BT-4
Porcentagem passante na peneira #200		70%	85%
Limites de Atterberg	LL (%)	26	32
	LP (%)	17	15
	IP (%)	8	17
Compactação Proctor	Dens. seca aparente máxima (mg/m ³)	2,084	1,86
	Umidade ótima (%)	9,4	6,18 a 8,07
CBR	100% GC (%)	2,5	1,7
	95% GC (%)	1,7	0,2
	Expansão (%)	3,56	0,06
Cisalhamento direto	Ø (°)	26	30
	c'	0	0
Permeabilidade (m/s)		8x10 ⁻¹⁰	2x10 ⁻⁹
Porosidade		0,355	0,418

Fonte: adaptado de Morales et al. (2019)

Os resultados referentes às porcentagens passantes na peneira #200 foram obtidos com as amostras trituradas. A quantidade de finos nas amostras tratadas é superior às não tratadas,

provavelmente, devido à quebra do carbonato de cálcio. No que diz respeito aos limites de consistência, o IP (índice de plasticidade) aumenta como resultado de um aumento no LL (limite de liquidez) e diminuição no LP (limite de plasticidade) para a amostra BT-4.

Enquanto são plotadas curvas de compactação na energia padrão do Proctor para a amostra original, para amostras tratadas, apenas um ponto é calculado. Esse ponto plotado nas amostras tratadas é obtido das condições iniciais de preparação, ou seja, com energia normal e umidade ideal menos 2%, correspondendo às respectivas amostras naturais. Portanto, a amostra tratada não atinge o valor ideal de umidade, além de possuir um conteúdo mais alto de agregados rígidos. Consequentemente, não é possível atingir o mesmo valor de densidade aparente seca máxima (p_d) e umidade ótima ($w_{ót}$) que o da amostra natural. Assim, as condições compactadas da amostra tendem a se localizar com mais frequência no lado seco do plano de compactação.

Em relação ao ensaio CBR, para comparar os resultados das amostras tratadas e não tratadas que foram submetidas a esse teste, os autores decidiram manter inalterada uma das propriedades que definem o estado da amostra, ou seja, o grau de saturação, uma vez que nem a $w_{ót}$ e nem o p_d permanecem constantes após o tratamento microbiológico. Isso ocasionou os piores resultados para o índice CBR nas amostras tratadas do que nas amostras naturais. Os valores obtidos indicam que a porcentagem da força exercida pelo pistão no cilindro para uma determinada penetração, em relação à mesma força correspondente à mesma penetração de um tipo de sonda, é menor para a amostra tratada. Além disso, a expansão é menor para a amostra tratada.

Os resultados de resistência ao cisalhamento se mostram um pouco superiores nas amostras tratadas, para os níveis de carregamento investigados. Os autores ressaltam que a produção de calcita a partir de bactérias não gera uma coesão aparente na amostra, portanto, os resultados não devem ser interpretados como efeito da cimentação. Em vez disso, observa-se um aumento do ângulo de atrito, apesar de haver maior porosidade nas amostras tratadas. Esse fato pode ser causado pela quebra de grande parte dos agregados formados durante o tratamento microbiológico, ou seja, parte do biocimento pode quebrar durante o processo de compactação, eliminando possíveis pontes de CaCO_3 formadas entre as partículas e tornando-se, de maneira geral, um material de enchimento dos poros.

Morales et al. (2019) concluem que a técnica microbiológica pode ser eficaz para melhorar as características mecânicas dos filitos de argila compactados, desde que seja fornecida mais energia na compactação da amostra tratada para garantir que ela seja estabilizada, alcançando assim uma alta densidade seca inicial. Além disso, a compactação pós-

envelhecimento destrói o efeito inicial de ligação/cimentação, fazendo com que o carbonato de cálcio triturado atue como material de enchimento dos poros. As propriedades de preenchimento podem ser observadas, também, por meio do ângulo de atrito maior das amostras tratadas, produzido sem alteração na coesão.

Dentre estudos mais recentes, Portugal et al. (2020) realizou revisão bibliográfica sobre a utilização da biocimentação como alternativa para estabilização de solos em geral. Como considerações importantes, foi constatado que a técnica é viável para o fim investigado, mas ainda precisa de desenvolvimento considerável. As principais lacunas encontradas foram: dificuldade de obtenção de uma biocimentação homogênea na área tratada e investigação de um método de injeção que permita essa precipitação homogênea de calcita pela profundidade do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste item, serão apresentados, inicialmente, os materiais utilizados para o estudo, incluindo o solo, a solução biocimentante e os microrganismos utilizados na bioaumentação. Em seguida, serão apresentados os métodos de planejamento dos experimentos e ensaios realizados para obtenção dos resultados.

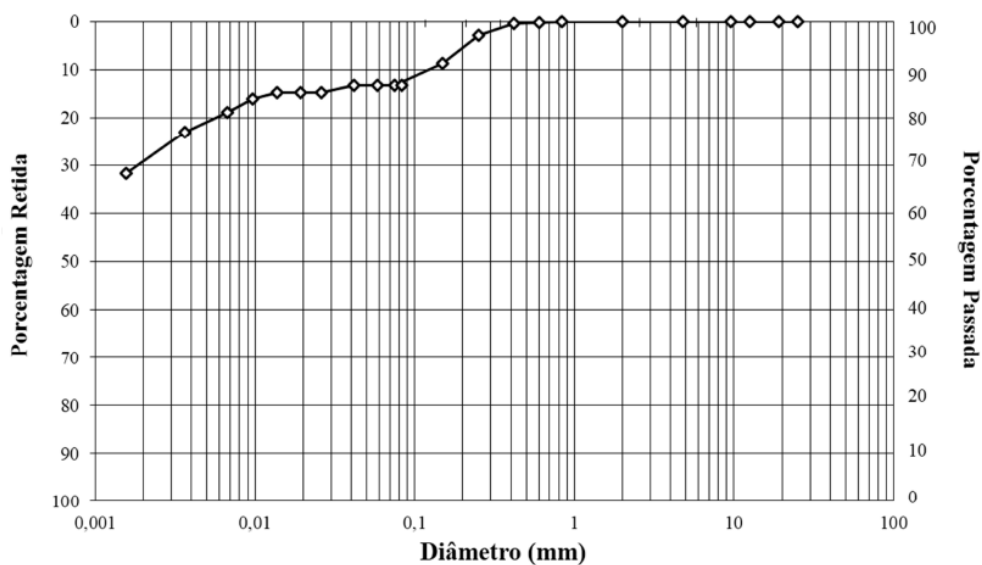
3.1 Solo

O solo utilizado no estudo é um solo argiloso, cuja coleta foi realizada no campus experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo, a partir do horizonte B do talude. Cecchin (2012), ao realizar a caracterização do solo, coletou amostras deformadas e executou os ensaios de granulometria, limites de Atterberg (liquidez e plasticidade), massa específica, curva característica de sucção, condutividade hidráulica, densidade dos grãos e porosidade, seguindo as recomendações das NBRs 6457/2016, 6459/2016, 7180/2016, 7181/2016 e 6508/1984.

Cecchin (2012) também realizou a caracterização físico-química do solo, de acordo com a metodologia proposta por Tedesco et al. (1992), definindo o pH em água, o teor de argila presente no solo, a concentração de matéria orgânica, os macrossais existentes (N, P, K, S, Ca, Mg), os microsais (Mn, Zn, Cu, Fe, Mo, B, Cl), os cátions trocáveis (Al, Na), a acidez potencial (Al+H), a capacidade de troca de cátions (CTC), a saturação por bases, saturação por alumínio e a saturação por K.

A Figura 8 apresenta a curva granulométrica do solo obtida por Cecchin (2012), e a Tabela 4, a caracterização geotécnica e física do material. Sob o ponto de vista pedológico, o solo foi classificado como um Latossolo Vermelho Distrófico Húmico. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o material classificou-se como CH, ou argila de alta plasticidade.

Figura 8 - Curva granulométrica do solo



Fonte: Cecchin (2012)

Tabela 4 - Caracterização geotécnica, química e física do solo

Parâmetro	Valor
Argila (%)	72
Silte (%)	15
Areia (%)	13
Limite de Liquidez (%)	53,0
Limite de Plasticidade (%)	42,0
Peso Específico das Partículas (kN/m ³)	26,7
Índice de Vazios	1,19
Peso Específico Natural (kN/m ³)	16,3
Grau de Saturação (%)	75,7
Porosidade (%)	54
pH	5,1
Matéria orgânica (%)	<0,8
Condutividade hidráulica (cm/s)	1,39x10 ⁻³
Fósforo (mg/dm ³)	0,7
Potássio (mg/dm ³)	23
Alumínio (cmolc/dm ³)	2,7
Cálcio (cmolc/dm ³)	1,1
Magnésio (cmolc/dm ³)	0,7
H+Al (cmolc/dm ³)	10,9
CTC (cmolc/dm ³)	12,7
Saturação de Bases (%)	15
Saturação de Alumínio (%)	60

Fonte: adaptado de Cecchin (2012)

3.2 Solução bacteriana

As bactérias utilizadas para bioaugmentação são do gênero *Bacillus*, um isolado de solo de ID J3UPF com 99,96% de identidade após análise da sequência de 1388/1389 bases nucleotídicas da região 16S do DNA com *Bacillus Megaterium*. Conforme Almeida et al. (2019), os microrganismos foram extraídos de uma amostra do mesmo solo utilizado neste estudo, um latossolo argiloso, obtida do horizonte B. As bactérias foram isoladas e cultivadas em placas de ágar nutriente. A partir de seu crescimento, cada amostra foi inoculada em 250mL de caldo nutriente na concentração aproximada de 10^8 UFC/mL.

Almeida et al. (2019) realizou teste de atividade de urease com os microrganismos para verificar se estes são produtores da enzima urease, responsável por hidrolisar a ureia e permitir a formação de carbonato de cálcio. Na realização do teste, a mudança de cor do meio de amarelo para rosa indica que a bactéria é produtora de urease, e o resultado do teste pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Resultado do teste de urease dos microrganismos isolados do solo



Fonte: Almeida et al. (2019)

Para contaminação da quantidade necessária de caldo para todos os corpos de prova, foi utilizada a solução de bactérias já produzida por Almeida et al. (2019). O controle da concentração da solução foi feito por meio de leituras em equipamento espectrofotômetro, sendo a leitura de 0,063 o equivalente à concentração de $1,5 \times 10^8$ UFC/mL. No momento da aplicação da solução nos corpos de prova, a leitura do espectrofotômetro indicou 0,11, correspondendo à concentração de $2,62 \times 10^8$ UFC/mL.

O fato de serem utilizados microrganismos nativos do solo em estudo favorece a adaptação da solução bacteriana quando aplicada nos corpos de prova indeformados, já que o meio não se tornará agressivo para a população bacteriana inserida. A escolha dos microrganismos se deu, também, devido ao seu alto potencial de produção de urease. Nesse caso, a bioaugmentação serve para garantir que se tenha controle sobre a quantidade de bactérias existentes nos corpos de prova, assegurando que a quantidade seja suficiente para maiores chances de uma precipitação satisfatória de calcita. O uso de microrganismos exógenos ao solo requer estudos prévios para avaliar as condições de adaptação destes ao meio.

3.3 Solução biocimentante

A composição da solução biocimentante exerce influência direta sobre o resultado da biocimentação. Para este estudo, tanto no ensaio 1 quanto no ensaio 2, foi utilizada a mesma solução empregada no trabalho de Pacheco (2016) para solos arenosos, que foi usada, também, por Garbin (2016). A composição da solução pode ser conferida na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição da solução biocimentante

Reagente	Concentração (g/L)
Peptona	2
Extrato de levedura	1
Cloreto de amônia	10
Bicarbonato de sódio	2,12
Ureia	30
Cloreto de cálcio	56

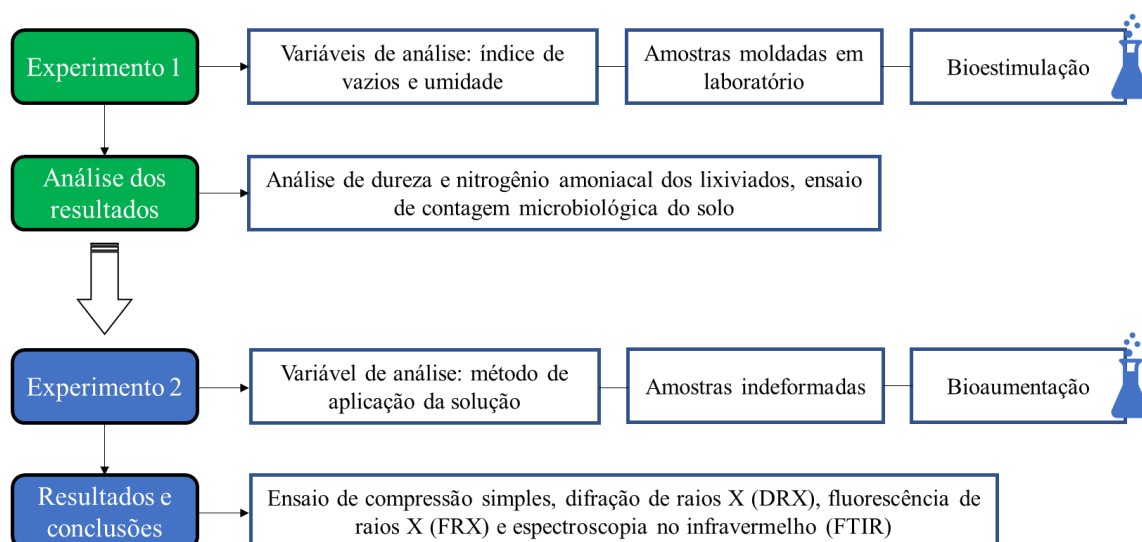
Fonte: Pacheco (2016)

3.4 Delineamento geral da pesquisa

A Figura 10 apresenta o fluxograma com o delineamento experimental de todas as etapas desenvolvidas neste trabalho. Inicialmente, foi realizado um ensaio para investigação da influência do índice de vazios e da umidade do solo na precipitação de carbonato de cálcio, denominado Experimento 1 e descrito no item 4.5, para decidir sobre a utilização de amostras deformadas ou indeformadas. Através dos resultados, foram realizados ajustes na metodologia para realização de novo ensaio, denominado Experimento 2, com objetivo de investigar a

influência do método de aplicação da solução de alimentação nos corpos de prova, descrito no item 4.6.

Figura 10 - Fluxograma geral da pesquisa



3.5 Experimento 1

Com o objetivo de analisar a influência do índice de vazios e da umidade de moldagem dos corpos de prova na eficiência da biocimentação, foi realizado ensaio com experimento fatorial completo do tipo 3^2 , ou seja, com 2 variáveis de controle variando em 3 níveis. As variáveis de controle foram o índice de vazios e a umidade de moldagem, com os valores correspondentes aos níveis apresentados na Tabela 6, correspondendo à matriz real e codificada do experimento 1, bem como apresentação das variáveis que foram fixadas e os fatores de ruído.

O experimento foi realizado para verificar se as condições de moldagem dos corpos de prova exercem influência sobre a eficiência da biocimentação, para que, na concepção do experimento 2 da pesquisa, pudesse ser decidido sobre utilização de amostras deformadas ou indeformadas.

Para moldagem dos corpos de prova de estrutura deformada, foram utilizados como moldes tubos de PVC de 75mm de diâmetro e 200mm de altura. Foi mantida constante a massa de solo utilizada em cada corpo de prova (250g), sendo variada a altura dos mesmos a fim de atingir os índices de vazios estipulados. Os corpos de prova foram moldados com auxílio de prensa hidráulica, conforme Figura 11. Após moldagem, a parte inferior do molde foi encapada

com geotêxtil não tecido, para evitar o arrastamento de grãos de solo durante a percolação da solução, como pode ser visto na Figura 12.

Tabela 6 - Matriz real e codificada do experimento 1

Tratamento	Índice de vazios	Umidade de moldagem	Variáveis fixas	Ruído
1	1,19 (-)	25% (-)	Quantidade de solo, composição da solução biocimentante	Temperatura ambiente, microrganismos presentes no solo natural
2	1,69 (0)	25% (-)		
3	2,19 (+)	25% (-)		
4	1,19 (-)	30% (0)		
5	1,69 (0)	30% (0)		
6	2,19 (+)	30% (0)		
7	1,19 (-)	35% (+)		
8	1,69 (0)	35% (+)		
9	2,19 (+)	35% (+)		

Figura 11 - Moldagem dos corpos de prova em prensa hidráulica



Figura 12 – Geotêxtil para proteção da parte inferior do corpo de prova



Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à percolação da solução biocimentante. A quantidade de solução utilizada em cada aplicação foi de 2 vezes o volume de vazios do corpo de prova, conforme realizado por Pacheco (2016). Para controle da quantidade de solução percolada, foi mantido um recipiente para coleta do lixiviado abaixo do corpo de prova suspenso, em esquema conforme Figura 13. O procedimento foi monitorado por meio do controle do pH dos lixiviados.

Figura 13 - Esquema para percolação da solução biocimentante nos corpos de prova



Era prevista uma aplicação da solução biocimentante a cada 48h até que o líquido não pudesse mais percolar pelos corpos de prova. Após encerramento do ensaio, os lixiviados foram submetidos a análises de nitrogênio amoniacal e dureza para verificar as diferenças entre as concentrações de nitrogênio e carbonato de cálcio dos corpos de prova biocimentados e não biocimentados, e o solo foi analisado quanto à existência de população microbiana por meio de ensaio de contagem microbiológica.

3.5.1 Nitrogênio amoniacal

A quantidade de nitrogênio amoniacal presente nas amostras foi obtida partindo da metodologia de determinação do nitrogênio total Kjeldahl, baseada no “Standard Methods for the examination of water and wastewater”. Para tanto, são utilizados 40mL de amostra, na qual é adicionado 1 ou 2 gotas do indicador fenoftaleína e 10 gotas de hidróxido de sódio 6mol/L (ou quantidade suficiente para viragem do indicador). Colocar a mistura no equipamento para destilação e recolher em um recipiente com 20mL de ácido bórico até chegar a aproximadamente 100mL do destilado. Em seguida, titular com ácido sulfúrico 0,02mol/L até a solução passar de amarelo para rosa. A concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L) é dada pela Equação 6. O ensaio foi realizado em duplicata.

$$\text{Conc. Nitrogênio} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{0,28 \cdot V_{\text{titulante}}}{0,020\text{L}} \quad (6)$$

3.5.2 Dureza

A análise de dureza visa determinar a concentração dos íons cálcio e/ou magnésio no líquido em análise, expressos como carbonato de cálcio. O método de determinação da dureza adotado envolve a diluição de 25mL de amostra para 50mL com água destilada, em balão volumétrico, seguido da adição de 1mL ou 2mL da solução tampão para elevação do pH a 10+/- 1. Em seguida, é adicionado cerca de 0,05g do indicador *Eriochrome Black T* seguido de titulação com ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) 0,01M. O ponto de viragem corresponde ao desaparecimento da cor púrpura avermelhada e aparecimento da cor azul. O resultado, em mg/L de CaCO₃, é obtido por meio do volume total de EDTA utilizado para titulação das amostras, em comparação com a quantidade utilizada para titulação da solução branco, conforme Equação 7. O ensaio foi realizado em duplicata.

$$Conc. CaCO_3 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{V_{EDTA} * 1000}{V_{amostra}} \quad (7)$$

3.5.3 Contagem microbiológica

A quantificação das bactérias mesófilas aeróbias estritas e facultativas viáveis foi realizada segundo a metodologia da Instrução Normativa SDA – 62 do Capítulo I (BRASIL, 2003). Em erlenmeyers, foi adicionado 10 g de solo em 90 mL de solução salina peptonada 0,1% e posteriormente agitada. Após, realizou-se diluições sucessivas e o plaqueamento em placas de petri em PCA pela técnica *pour-plate*, acrescentando-se 1 mL das diluições. As placas foram incubadas em estufa a 36 °C por 48 h e, em seguida, contou-se o número de unidades formadoras de colônias, sendo o resultado expresso em UFC/g de solo. O ensaio foi realizado em duplicata e triplicata.

3.6 Experimento 2

O experimento 2 do estudo envolve a investigação da influência do método de aplicação da solução de bactérias e da solução de alimentação. Para tanto, foi elaborado um experimento comparativo simples, cuja variável de análise é o método de aplicação da solução (percolação e injeção). As variáveis fixas são o tipo de solo (argiloso), o modelo de corpo de prova (indeformado, decidido após análise dos resultados do experimento 1), a bactéria utilizada e a composição da solução biocimentante. Foram realizadas 9 repetições do experimento, em virtude de contratempos ocorridos no experimento 1 tais como danos nas amostras, totalizando 18 corpos de prova, mais 2 amostras branco, resultando em 20 corpos de prova. A Tabela 7 apresenta a numeração dos corpos de prova ensaiados e o método de aplicação da solução, em ordem de execução aleatória.

Todos os corpos de prova foram obtidos por meio de extração indeformada e, após serem moldados, os corpos de prova receberam uma camada de mistura de argila bentonítica e água em toda sua lateral e foram inseridos nos tubos de PVC. A aplicação da argila bentonítica serviu para encaixar perfeitamente os corpos de prova dentro dos tubos, vedando suas laterais e impedindo escapamento das soluções aplicadas por possíveis espaços vazios que pudessem ficar entre o corpo de prova e o tubo. Não foi aplicada bentonita no topo nem na base dos corpos de prova, apenas nas laterais para garantir que a solução percolasse através dos corpos de prova e não na interface destes com o tubo.

Tabela 7 - Corpos de prova do experimento 2

Corpo de prova	Método de aplicação da solução
CP1	Percolação
CP2	Percolação
CP3	Injeção
CP4	Injeção
CP5	Injeção
CP6	Percolação
CP7	Injeção
CP8	Percolação
CP9	Injeção
CP10	Percolação
CP11	Percolação
CP12	Injeção
CP13	Percolação
CP14	Injeção
CP15	Injeção
CP16	Percolação
CP17	Percolação
CP18	Injeção
CP19	Branco
CP20	Branco

Inicialmente, foi realizada uma aplicação de solução de bioaugmentação contendo a bactéria *Bacillus Megaterium* na concentração de $2,62 \times 10^8$ UFC/mL, conforme indicado por meio de leitura em espectrofotômetro. A solução bacteriana foi percolada nos corpos de prova submetidos à percolação e injetada nos corpos de prova submetidos à injeção. Os brancos receberam apenas água destilada.

Após 48 horas da aplicação da solução bacteriana, foi realizada a primeira aplicação da solução de alimentação. As demais aplicações também ocorreram com intervalo de 48 horas. Antes de cada aplicação, o lixiviado obtido da aplicação anterior era pesado para determinar o volume, tinha o seu pH medido e era submetido a observações visuais como alterações de cor e presença/ausência de partículas sólidas. O critério de parada do ensaio era a solução não percolar mais pelos corpos de prova ou as últimas leituras de pH do lixiviado terem permanecido estáveis, sem alterações. Desta maneira, alguns corpos de prova encerraram o ensaio antes dos outros.

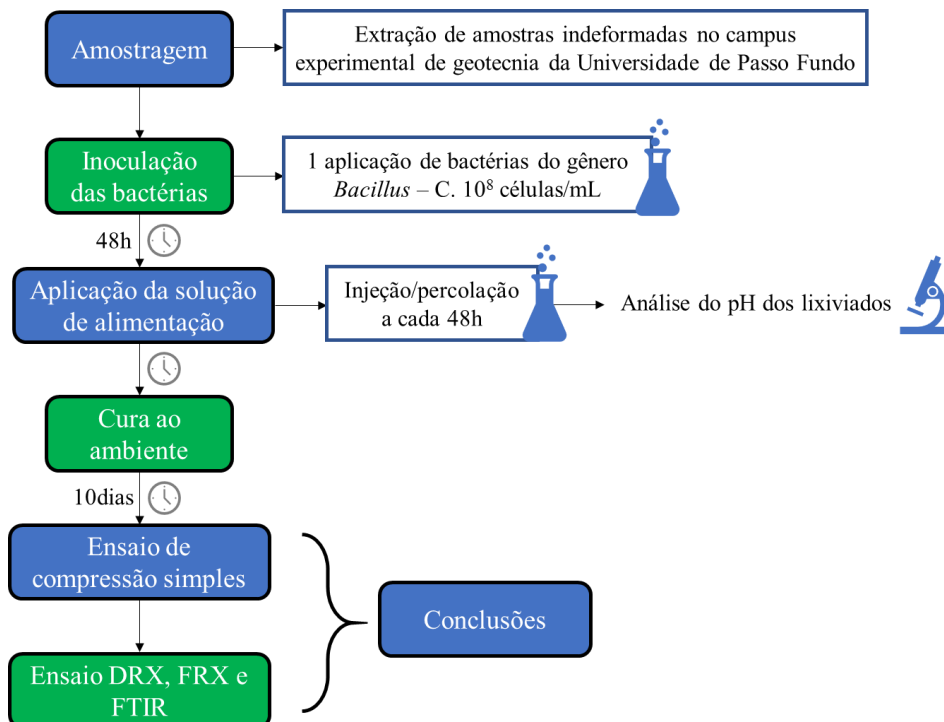
A variável de saída é a resistência mecânica dos corpos de prova, medida por meio de ensaio de compressão simples. Complementarmente, foram realizadas análises FTIR

(espectroscopia no infravermelho), DRX (difração de raios-X), FRX (fluorescência de raios-X) e análises químicas. O objetivo é verificar a influência do método de aplicação na precipitação de calcita nos corpos de prova.

3.6.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental do experimento 2 envolve a utilização de amostras indeformadas de solo, extraídas do campus experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo, a partir do horizonte B do talude. As amostras foram submetidas ao tratamento de bioaumentação, com uma única injeção/percolação da solução bacteriana e, após 48 horas, injeção/percolação da solução de alimentação a cada 48h, até que a solução não percole mais pelos corpos de prova. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos à cura em temperatura ambiente, durante 10 dias, dentro dos moldes, antes de serem submetidos ao ensaio de compressão simples e, após, às demais análises. O tempo de 10 dias foi escolhido baseado em pesquisa bibliográfica sobre biocimentação em solos argilosos, conforme levantamento realizado no Quadro 1 e, desta forma, espera-se que o tempo de cura contribua para a formação do biocimento. Durante realização das injeções/percolações, os lixiviados de cada corpo de prova foram coletados, medidos em volume e analisados quanto ao pH. A Figura 14 apresenta o delineamento experimental da pesquisa.

Figura 14 - Delineamento experimental da pesquisa

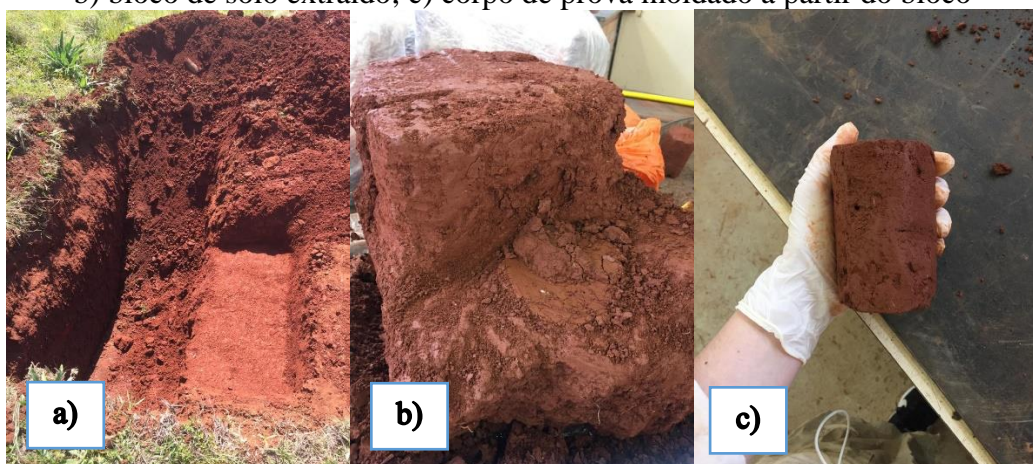


3.6.2 Extração das amostras

As amostras ensaiadas são amostras indeformadas de solo provenientes do campo experimental de geotecnia da Universidade de Passo Fundo. Os corpos de prova foram esculpidos nas dimensões de 530mm de diâmetro e 800mm de altura. O diâmetro escolhido é o equivalente ao diâmetro interno de um tubo PVC de 630mm de diâmetro comercial, e a altura corresponde ao dobro do comprimento da agulha utilizada para a injeção, de 400mm, para que o líquido fosse injetado na altura média do corpo de prova. O procedimento de coleta das amostras consistiu no seguinte:

- a) Um equipamento escavadeira realizou a abertura de trincheiras no solo. Com auxílio de equipamentos manuais como pás, picaretas e espátulas, foram coletados blocos de solo de dimensões 30x30x30cm;
- b) Em seguida, os blocos foram parafinados em duas camadas e acondicionados em plástico tipo *insulfilm* e, em seguida, em plástico bolha, para que não ocorra perda da umidade natural do solo;
- c) No laboratório, os corpos de prova foram esculpidos manualmente nas dimensões desejadas, atentando-se para não provocar danos na estrutura natural do solo. A Figura 15 apresenta a sequência de etapas para extração e moldagem das amostras.

Figura 15 - Processo de extração e moldagem dos corpos de prova: a) abertura da trincheira; b) bloco de solo extraído; c) corpo de prova moldado a partir do bloco



3.6.3 Aplicação das soluções nos corpos de prova

Conforme especificado no planejamento experimental, parte dos corpos de prova receberam as soluções por percolação, e parte por injeção. Da mesma maneira que no ensaio 1, a quantidade de solução prevista para cada aplicação era de duas vezes o índice de vazios dos corpos de prova, que, para o solo no estado natural, é de 1,19. Porém, durante a realização do ensaio, percebeu-se grande dificuldade de realizar as injeções nos corpos de prova, parte da solução era aplicada internamente e logo o corpo de prova saturava e a solução começava a acumular em seu topo. Devido a isso, a quantidade de solução aplicada em cada corpo de prova em cada aplicação foi reduzida para o equivalente a uma vez o índice de vazios de 1,19, resultando em aproximadamente 130mL de solução por aplicação.

Os corpos de prova percolados tiveram a solução aplicada em seu topo e a absorção ocorreu por gravidade. Os corpos de prova injetados receberam a solução por meio de uma sonda ligada a uma agulha aplicada em 2 pontos distintos. Na extremidade da sonda foi posicionada uma seringa, e o controle da pressão de injeção foi realizado por meio do tempo de aplicação da solução. Foi determinado o tempo de 1 minuto (60 segundos) para aplicar uma seringa inteira de 60mL, resultando em uma vazão de aplicação de 1mL/s. A Figura 16 representa o esquema para aplicação das soluções nos corpos de prova, e a Figura 17 apresenta as agulhas utilizadas nas injeções.

Figura 16 - Aplicação das soluções nos corpos de prova

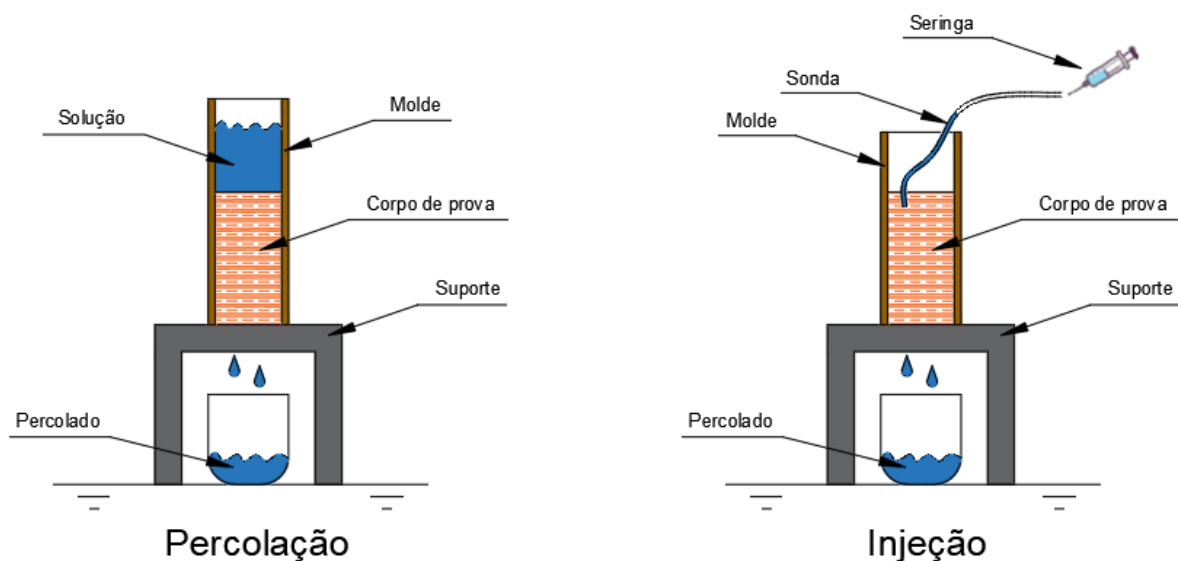


Figura 17 – Agulhas utilizadas nas injeções



Como pode ser observado na Figura 17, as agulhas utilizadas são de aço inoxidável, não possuem abertura nas extremidades, apenas aberturas laterais, para evitar o entupimento quando cravadas nos corpos de prova. Cada agulha possui 8cm de comprimento e diâmetro interno de 2,5mm. Cada agulha possui 2 furos laterais de diâmetro 2,5mm por meio dos quais a solução foi injetada nas amostras.

3.6.4 Ensaio de resistência à compressão simples

Após cura de 10 dias dos corpos de prova, foi realizado ensaio de compressão simples seguindo o especificado na NBR 12770, a fim de avaliar a resistência do solo biocimentado à compressão. O ensaio consiste na aplicação de carregamento axial em prensa simples não sendo possível aplicar tensões de confinamento lateral. Este tipo de ensaio é amplamente utilizado na literatura para analisar a eficiência da biocimentação nos corpos de prova, por ser um ensaio simples, de rápida execução, baixo custo, confiável e de experiência já consolidada.

3.6.5 Difração de raios X (DRX)

Para verificação da homogeneidade da biocimentação nos corpos de prova, estes serão submetidos, após a realização do ensaio de compressão simples, a ensaio de difração de raios X (DRX). Esta técnica permite a identificação mineral através da caracterização de sua estrutura

cristalina, visto que a composição e as fases cristalinas são parâmetros fundamentais para a caracterização de solos, sedimentos e argilas.

A difração de raios X é um fenômeno de interação entre a radiação eletromagnética (raios X) e a matéria ordenada. A incidência de raios X sobre um átomo provoca o espalhamento da radiação em todas as direções, e a difração é caracterizada pela interferência construtiva dos raios X espalhados provenientes de vários átomos (SCAPIN, 2003). A difração de raios X ocorre segundo a Lei de Bragg (Equação 8), que estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram (ALBERS et al., 2002):

$$n\lambda = 2 * d * \sin \theta \quad (8)$$

Onde:

n= número inteiro;

λ = comprimento de onda dos raios X incidentes;

d= distância interplanar;

θ = ângulo de difração.

Os resultados desse tipo de ensaio são apresentados sob forma de gráfico denominado difratograma, cujas variáveis plotadas são o ângulo 2θ (eixo x) versus a intensidade dos picos difratados (eixo y). Para interpretação dos resultados, recorre-se a um banco de dados, visto que cada estrutura cristalina produz um padrão de difração característico. Portanto, os resultados se dão mediante comparação dos padrões obtidos com padrões de estruturas conhecidas e previamente analisadas.

A realização do ensaio DRX nas amostras possibilitará a observação da distribuição da biocimentação pelos corpos de prova, analisando se há regiões com maior concentração de calcita ou se houve alguma interação entre os minerais do solo com os componentes da solução de alimentação.

3.6.6 Fluorescência de raios X (FRX)

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica utilizada para determinar a composição química de uma determinada amostra, fornecendo a caracterização quantitativa e qualitativa, bem como traços dos constituintes do material analisado. Consiste em incidir um feixe de raios X sobre a amostra e produzir radiações fluorescentes, que são características de cada elemento químico. As radiações são difratadas por um cristal analisador, também de acordo com a Lei de Bragg, e captadas por um detector (SCAPIN, 2003).

De maneira semelhante que a difração de raios X, espera-se que o ensaio de FRX possibilite a identificação dos componentes químicos encontrados nas amostras de solo após a biocimentação.

3.6.7 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é um método de caracterização físico para análises qualitativas e determinações quantitativas de traços de elementos. O ensaio baseia-se na frequência de vibração dos átomos, que varia de acordo com a estrutura, composição e modo de vibração da amostra, cuja frequência é varrida por meio do infravermelho.

Espera-se que o ensaio FTIR, de maneira semelhante ao ensaio FRX, possibilite a identificação e quantificação dos componentes químicos encontrados nas amostras de solo, revelando as interações entre o solo e o biocimento.

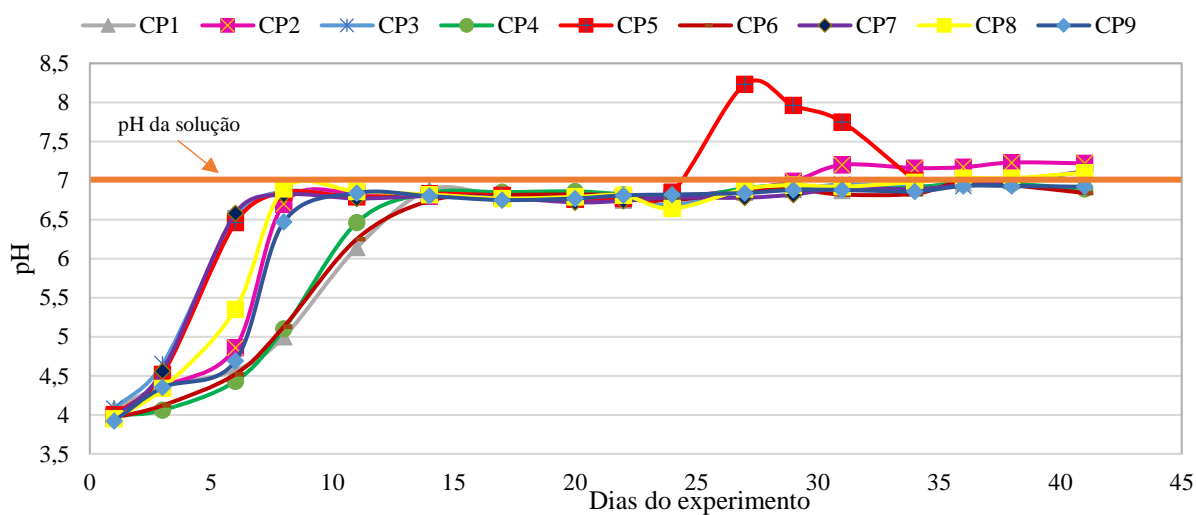
4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na dissertação, sendo o item 5.1 correspondente ao experimento 1, e o item 5.2 correspondente ao experimento 2. Foram realizadas análises estatísticas que são discutidas dentro dos itens, juntamente com considerações relevantes sobre os experimentos, contribuindo para a discussão.

4.1 Experimento 1

Durante a realização do experimento 1, observou-se uma dificuldade de ocorrência da biocimentação devido aos baixos valores de pH obtidos nos lixiviados. Apenas um corpo de prova (CP5) apresentou pico de pH, indicando precipitação de carbonato de cálcio, totalizando as 14 aplicações previstas. Os demais corpos de prova não apresentaram aumentos de pH indicativos de formação do biocimento, o que levou ao aumento do número de aplicações da solução até 17, na tentativa de ocorrência do fenômeno, sem sucesso. A Figura 18 apresenta a variação de pH nos corpos de prova durante a realização do ensaio.

Figura 18 - pH da solução e dos lixiviados dos corpos de prova

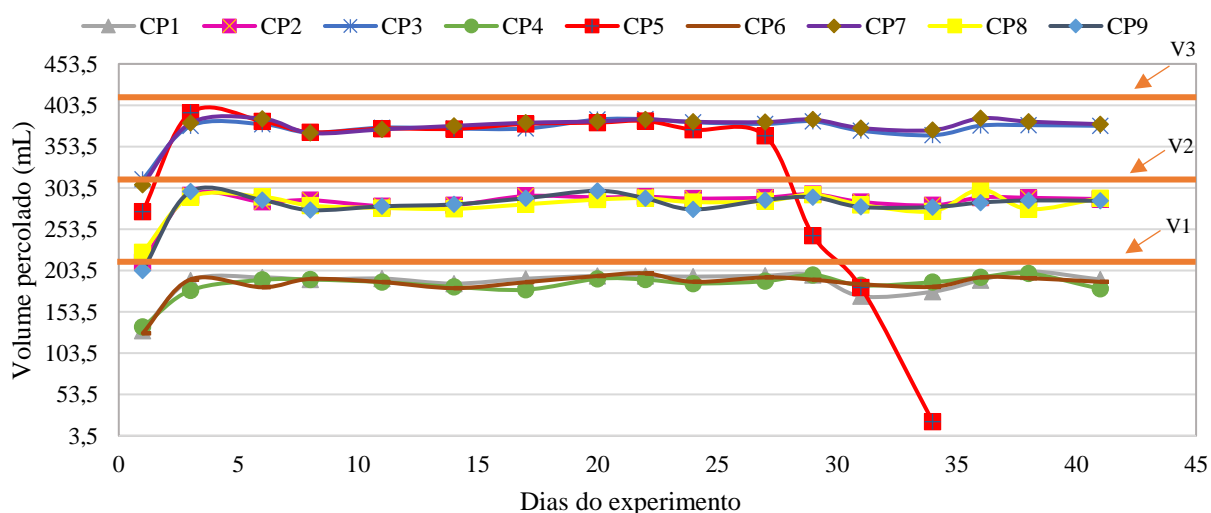


O pH da solução, medido antes de cada aplicação nos corpos de prova, manteve-se constante com valores girando em torno de 7,0. Observa-se que, até o 5º dia do experimento, o pH dos lixiviados era extremamente baixo, com valores em torno de 4,0 ou 4,5, caracterizando um meio ácido. A partir do 5º dia, o pH dos lixiviados se aproximou do valor do pH da solução e manteve-se constante até o final do ensaio. A única exceção foi o CP5, que apresentou pico de pH (8,23) na 11ª aplicação (27 dias), e posterior redução gradual até a 14ª aplicação (34

dias), quando a solução parou de percolar pelo corpo de prova. Os demais protótipos foram submetidos a mais 3 aplicações (41 dias) na expectativa de subida do pH, o que não ocorreu.

Segundo Stocks-Fisher et al. (1999), os valores de pH indicativos de precipitação da calcita variam entre 8,5 e 9,0. Baseado nisso, no experimento realizado, o único corpo de prova que apresentou pH próximo de 8,5 e, conseqüentemente, probabilidade de formação de calcita, foi o CP5, fato comprovado pela medição dos volumes dos lixiviados, que apresentaram redução gradual no CP5 a partir da 11ª aplicação (27 dias), como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Volume da solução e dos lixiviados dos corpos de prova



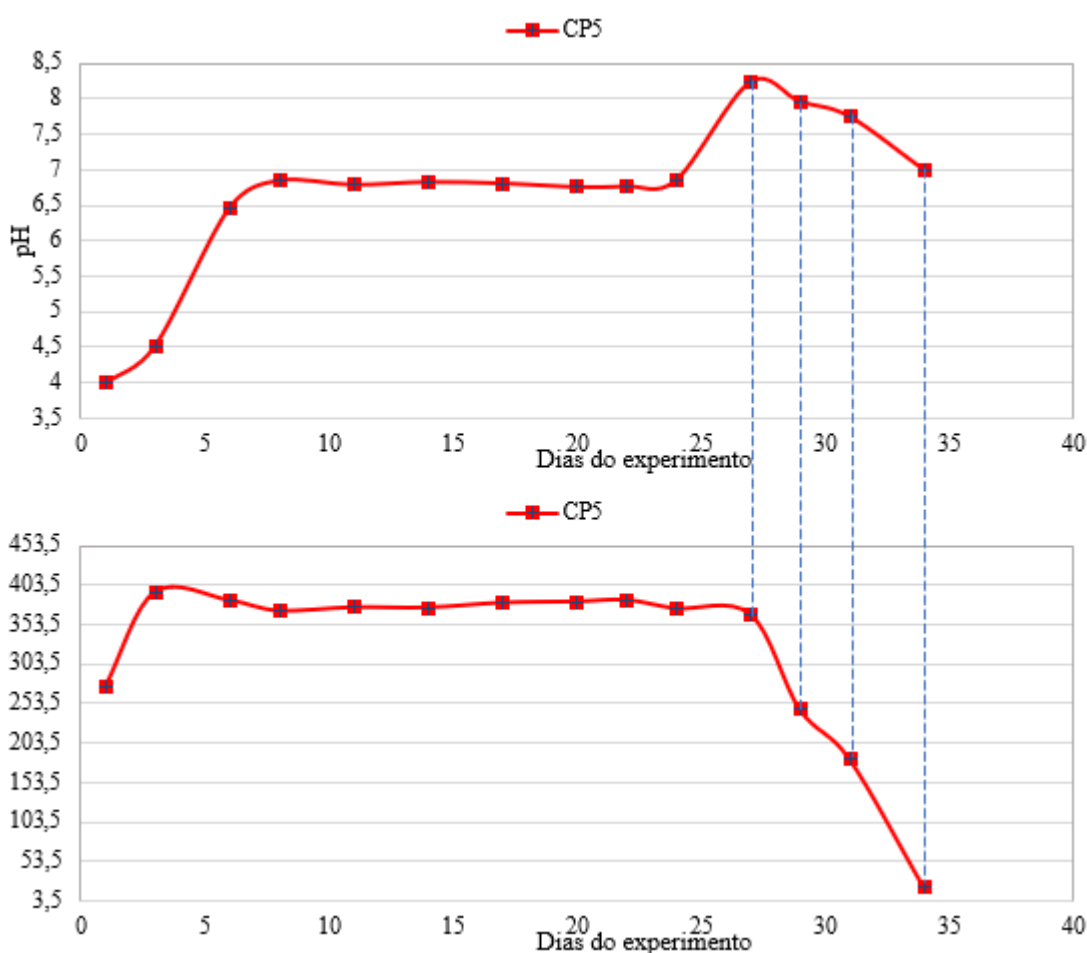
Conforme especificado na metodologia, a quantidade de solução utilizada em cada aplicação foi de 2x o volume de vazios dos corpos de prova. Nesse caso, os corpos de prova moldados com índice de vazios de 1,19 (CP1, CP4 e CP6) receberam, por aplicação, o volume de solução de $V1=222,8\text{mL}$. Os corpos de prova moldados com índice de vazios de 1,69 (CP2, CP8 e CP9) receberam $V2=316,5\text{mL}$ de solução por aplicação, e os moldados com índice de vazios de 2,19 (CP3, CP5 e CP7) receberam $V3=410,1\text{mL}$ de solução por aplicação. Estes valores iniciais aparecem indicados na Figura 19.

De maneira geral, observa-se uma redução aproximada de 30% a 40% do volume lixiviado em relação ao volume inicial na primeira aplicação. Acredita-se que esta redução se deva ao fato dos sais da solução ficarem aderidos aos grãos de solo, visto que, nas aplicações seguintes, o volume do lixiviado representou cerca de 90% do volume inicial aplicado. No CP5, onde foi observado o pico de pH aos 27 dias do experimento, observou-se uma redução gradual do volume lixiviado a partir deste momento, conforme ilustrado pela Figura 20, percolando

apenas cerca de 5% na última medição (34 dias). Nos demais corpos de prova, o volume percolado permaneceu constante até o final do experimento.

Além do pico de pH e redução do volume lixiviado no CP5, parâmetros indicativos de precipitação de biocimento, foi comprovada, por meio de observação tátil-visual, a ocorrência de biocimentação no CP5, por meio do visível enrijecimento da porção superior do corpo de prova. Na extração de amostras de solo do CP5 para os ensaios subsequentes, observou-se grande dificuldade na coleta das amostras por meio da ruptura do corpo de prova, por este estar muito rígido, o que não foi observado nos demais corpos de prova.

Figura 20 - Evolução do pH e volume lixiviado do CP5 durante o experimento



4.1.1 Nitrogênio amoniacal e dureza

Visto que houveram indícios de ocorrência de biocimentação em apenas 1 corpo de prova (CP5), realizou-se a análise de nitrogênio amoniacal e dureza nos lixiviados visando caracterizar alguma diferença entre o teor de nitrogênio e quantidade de carbonato de cálcio no

corpo de prova biocimentado em relação aos demais. A Tabela 8 apresenta os resultados das análises, obtidos por meio dos lixiviados coletados a partir da 11ª aplicação (na qual observou-se o pico de pH do CP5).

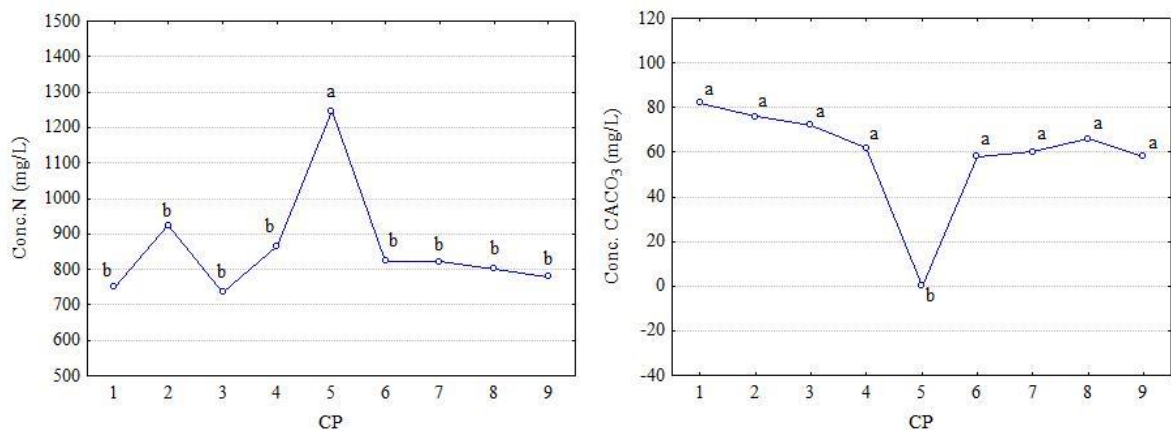
Com o objetivo de analisar se houveram diferenças entre as concentrações de nitrogênio e carbonato de cálcio dos corpos de prova sem indício de biocimentação em relação ao corpo de prova biocimentado (CP5), foi realizado teste de grupos homogêneos (teste de Tukey). Por meio deste e conforme ilustrado na Figura 21, pode-se observar que, tanto o valor de concentração de nitrogênio quanto o valor de concentração de carbonato de cálcio foram estatisticamente diferentes para o CP5, enquanto que os demais CPs apresentaram valores estatisticamente iguais ($p < 0,05$).

Tabela 8 - Análise de nitrogênio amoniacal e dureza nos lixiviados

Corpo de prova	Índice de vazios	Umidade de moldagem	Concentração de N (mg/L)	Concentração de CaCO ₃ (mg/L)
CP1	1,19	25%	749,7 ^b	82 ^a
CP2	1,69	30%	924,7 ^b	76 ^a
CP3	2,19	35%	735,7 ^b	72 ^a
CP4	1,19	35%	866,6 ^b	62 ^a
CP5	2,19	25%	1247,4 ^a	0 ^b
CP6	1,19	30%	823,9 ^b	58 ^a
CP7	2,19	30%	822,5 ^b	60 ^a
CP8	1,69	35%	802,2 ^b	66 ^a
CP9	1,69	25%	779,8 ^b	58 ^a

Legenda: CP: Corpo de prova; N: nitrogênio; CaCO₃: carbonato de cálcio. Média, n = 2. Letras iguais na mesma coluna indicam que não apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) ao nível de 95% de confiança.

Figura 21 - Média das concentrações de N (mg/L) e CaCO₃ (mg/L) em relação ao CP



A Tabela 9 apresenta a ANOVA dos efeitos estimados e o nível de significância (p) das variáveis do delineamento fatorial completo (3²) sobre a concentração de nitrogênio, e a Tabela 10 apresenta os efeitos sobre a concentração de carbonato de cálcio, sendo analisados os efeitos principais e não de interação. Por meio dos resultados apresentados nas tabelas, observa-se que nenhum dos fatores, nem umidade nem índice de vazios, exerceu influência significativa sobre as variáveis de resposta.

Importante destacar que o teste de Tukey e a ANOVA estão testando efeitos diferentes. O Tukey comparou os corpos de prova uns com os outros em relação à concentração de nitrogênio e dureza, o que comprovou que o CP5 é estatisticamente diferente dos demais (independentemente do seu índice de vazios e umidade). Já a análise ANOVA avaliou se os resultados de concentração de nitrogênio e dureza poderiam ser atribuídos à umidade e o índice de vazios de moldagem, e o resultado provou que não. Isto explica por que o teste de Tukey resultou em uma análise significativa e a ANOVA não.

Tabela 9 - Efeitos estimados das variáveis sobre a concentração de nitrogênio

Fator	SS	MS	Graus de liberdade	F	Valor p
Índice de vazios	50506,8	25253,40	2	0,948227	0,412661
Umidade (%)	46398,0	23199,0	2	0,871087	0,441552
Erro	346219,1	26632,24	13	-	-

Tabela 10 - Efeitos estimados das variáveis sobre a dureza

Fator	SS	MS	Graus de liberdade	F	Valor p
Índice de vazios	2117,333	1058,667	2	2,342714	0,135248
Umidade (%)	1456,00	728,00	2	1,610985	0,237115
Erro	5874,667	451,897	13	-	-

4.1.2 Contagem microbiológica

O ensaio de contagem microbiológica foi realizado com amostras de solo coletadas do corpo de prova biocimentado (CP5), de um dos corpos de prova não biocimentados (CP1) e, também, com uma amostra de solo natural, coletada diretamente do talude do campus experimental de Geotecnia da Universidade de Passo Fundo. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 11.

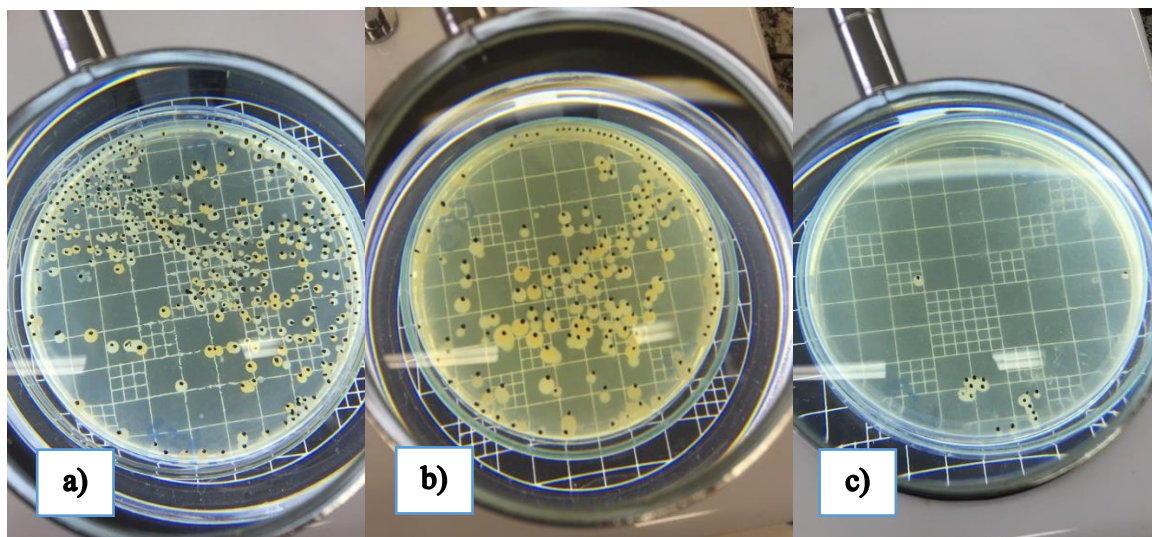
Tabela 11 - Contagem bacteriana das amostras

Amostra	Contagem bacteriana (UFC/g de solo)
CP1	$1,1 \times 10^6$
CP5	$1,6 \times 10^5$
Solo natural	Abaixo do limite de detecção

Observa-se que tanto o CP1 quanto o CP5 apresentaram população bacteriana semelhante, enquanto que a amostra de solo natural não apresentou bactérias em quantidade significativa para serem expressas na contagem, ou seja, apresentou um valor abaixo do limite de detecção do ensaio. Na Figura 22 pode-se observar os resultados da contagem para a diluição 10^{-3} para as 3 amostras analisadas.

Atribui-se a existência de bactérias nos corpos de prova ao fato destes terem sido estimulados com solução de alimentação durante vários dias, o que pode ter desencadeado o crescimento bacteriano, fenômeno não observado na amostra de solo natural. Pela análise da Figura 22, percebe-se que o solo natural possui microrganismos, porém sua quantidade é inferior à mínima prescrita na Instrução Normativa SDA – 62 do Capítulo I (BRASIL, 2003) para inclusão no cálculo e contagem.

Figura 22 - Ensaio de contagem microbiológica para: a) CP1; b) CP5; c) solo natural



4.1.3 Análise do experimento 1

Como primeira tentativa de ocorrência de biocimentação no solo argiloso residual, o experimento 1 funcionou como um teste. Esperava-se que os corpos de prova com maiores índices de vazios apresentassem precipitação de calcita mais evidente, devido ao maior espaço

disponível entre os grãos de solo para percolação da solução. Porém, não foi o que aconteceu, mediante análise dos resultados onde visivelmente apenas um corpo de prova, o CP5, apresentou precipitação de calcita.

Como o mecanismo de ocorrência da biocimentação em solos argilosos ainda é pouco estudado e, conseqüentemente, carece de embasamento teórico, foram realizadas as análises de nitrogênio amoniacal e dureza dos lixiviados para verificar as diferenças químicas entre o corpo de prova biocimentado e os demais, buscando uma resposta para o fato de somente o CP5 ter biocimentado. Os resultados das análises químicas apenas evidenciam que o fenômeno biocimentação altera a composição química dos lixiviados, não contribuindo para elucidar o comportamento do biocimento em argilas.

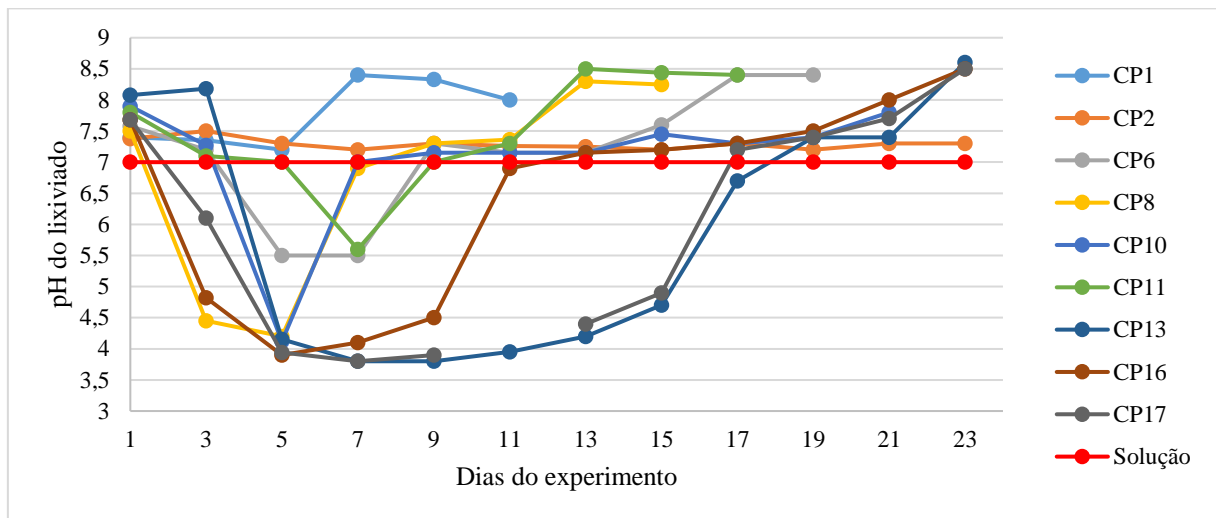
Ainda buscando respostas para a biocimentação do CP5, foi realizado ensaio de contagem microbiológica, que mostrou a baixa concentração de microrganismos na amostra de solo natural, sugerindo que a quantidade de microrganismos do solo talvez fosse insuficiente para a formação da calcita. Foi baseado no resultado do ensaio de contagem microbiológica que se decidiu por realizar o experimento 2 utilizando bioaugmentação, ou seja, a inserção de microrganismos nas amostras, para garantir a existência de microrganismos em uma concentração adequada para sintetizar os nutrientes fornecidos e formar o carbonato de cálcio.

De posse de todas essas informações, atribuiu-se a biocimentação do CP5 a uma contaminação cruzada, sendo este corpo de prova uma exceção em relação aos demais que não biocimentaram. O experimento 2 foi planejado considerando que o índice de vazios e a umidade não foram variáveis significativas para o estudo, portanto foram retiradas da análise, e considerando a existência de baixa quantidade de microrganismos no solo natural, fator responsável pelo insucesso da biocimentação nos corpos de prova.

4.2 Experimento 2

A Figura 23 apresenta o monitoramento de pH dos corpos de prova percolados, e a Figura 24 para os corpos de prova injetados. O ensaio durou um total de 23 dias, sendo o dia 1 correspondente à aplicação da solução bacteriana. Também aparece plotado nos gráficos o pH da solução antes da aplicação, que é constante e igual a 7.

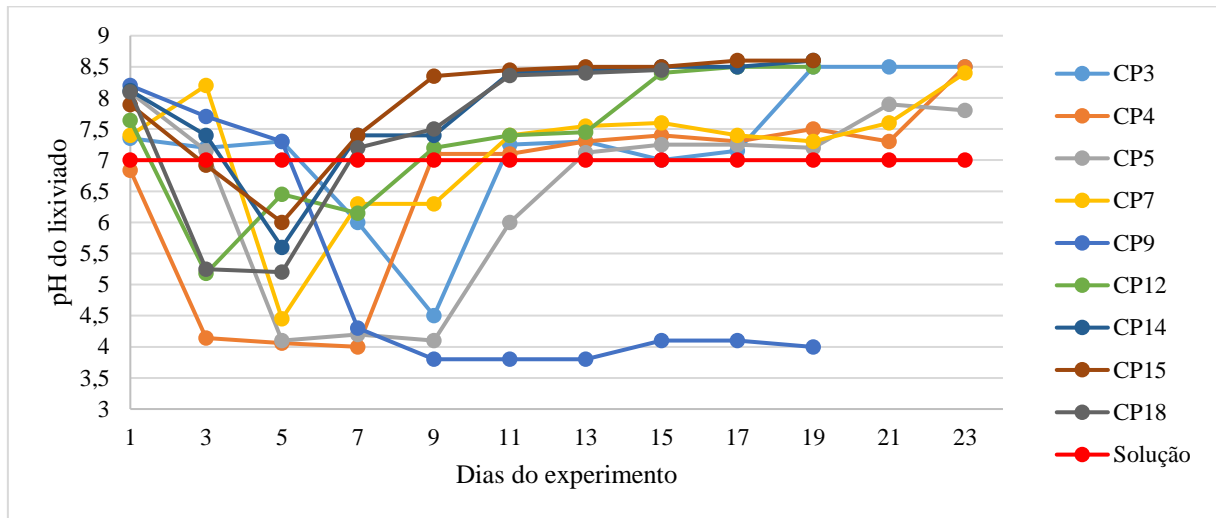
Figura 23 - pH dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à percolação



Percebe-se que os lixiviados da solução bacteriana (dia 1), que inicialmente tinha um pH de 7, giraram em torno de 7,5 a 8. Após a primeira aplicação da solução de alimentação (dia 3), há uma tendência de diminuição do pH dos lixiviados, como no caso dos corpos de prova 6, 8, 10, 13, 16 e 17, com valores abaixo de 5,5, caracterizando um meio ácido. Os corpos de prova 1 e 2 não apresentaram valores de pH inferiores a 7, sendo que no sétimo (7º) dia de experimento, o lixiviado do CP1 já apresentou pH superior a 8, caracterizando início de formação de carbonato de cálcio, que se comprovou nas medições seguintes e levou ao encerramento do ensaio para o CP1 no 11º dia. O CP2 não apresentou variação significativa de valores de pH, permanecendo em torno de 7,5 durante todo o experimento. O CP8 foi encerrado no dia 15, o CP11 no dia 17 e o CP6 no dia 19.

O CP11 teve uma medição de pH inferior a 7 no dia 7, subindo na medição seguinte. Os corpos de prova 13, 16 e 17 permaneceram na faixa ácida de pH durante um período mais longo, necessitando de mais aplicações para elevar estes valores. Há uma interrupção na curva de pH do CP17 no dia 11 devido à quebra do béquer que continha o lixiviado deste dia, impossibilitando a medição. Ao final do ensaio, todos os corpos de prova, com exceção do CP2, apresentaram pH igual ou superior a 8, indicando a precipitação de calcita. Embora o CP2 não tenha obtido pH acima de 8 nos lixiviados, visualmente era possível identificar cristais de biocimento precipitados em seu topo.

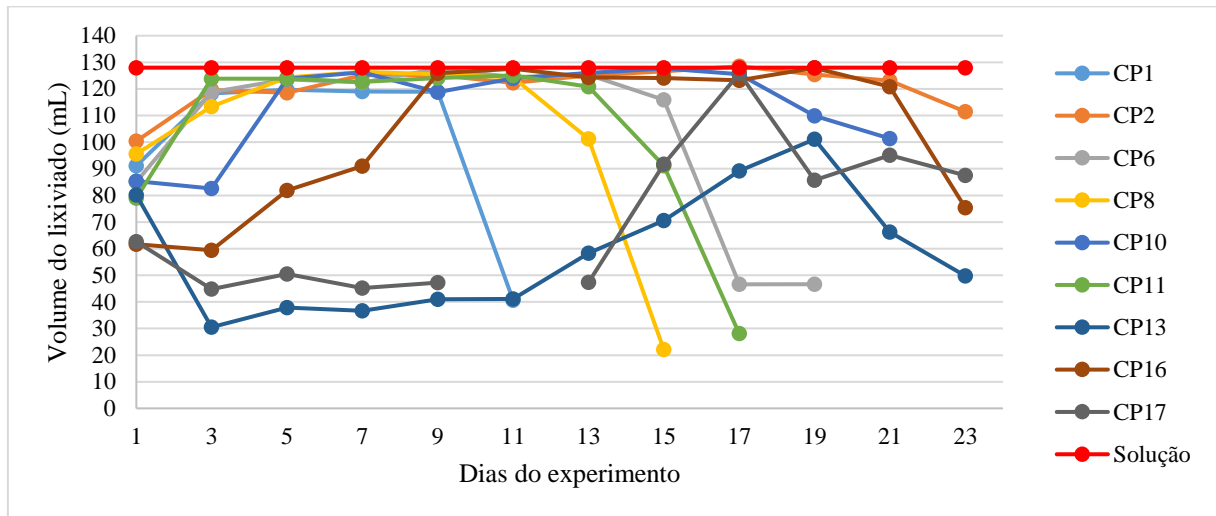
Figura 24 - pH dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à injeção



Nos corpos de prova injetados, o pH dos lixiviados após aplicação da solução bacteriana variou entre 6,9 e 8,1. Nas aplicações subsequentes houve grande variação nos valores de pH, sendo que todos os corpos de prova apresentaram valores ácidos em algum momento do ensaio. Os corpos de prova 9, 12, 14, 15 e 18 foram encerrados no dia 19, sendo que, dentre estes, apenas o CP9 não saiu da zona ácida de pH. Ao final do ensaio, todos os corpos de prova, com exceção do CP9, apresentaram pH próximo ou acima de 8, indicando a formação de carbonato de cálcio.

Os corpos de prova também foram monitorados a respeito do volume do lixiviado durante a realização do ensaio. A Figura 25 apresenta a variação de volume dos lixiviados dos corpos de prova percolados, e a Figura 26 apresenta o monitoramento de volume dos corpos de prova injetados. Também aparece plotado nos gráficos o volume de solução utilizada em cada aplicação, que é constante e igual a 128mL, o equivalente a uma vez o índice de vazios dos corpos de prova, calculado tomando-se o índice de vazios para o solo de Passo Fundo de 1,19.

Figura 25 - Volume (mL) dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à percolação

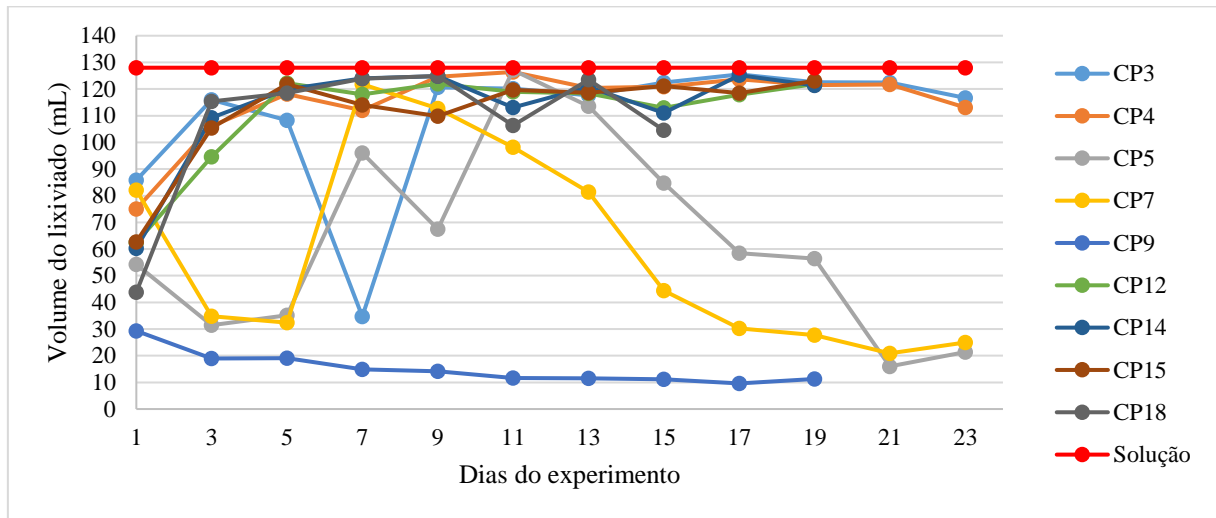


Em linhas gerais, observa-se um menor volume percolado decorrente da primeira aplicação em relação aos subsequentes, com algumas exceções. Isso se deve ao processo de saturação dos corpos de prova e também retenção de componentes das soluções pelo solo, partículas que ficam aderidas nos grãos. Alguns corpos de prova, como o CP13, CP16 e CP17 apresentaram baixos volumes percolados quando comparados com os demais. Visualmente, a solução não percolada permanecia acumulada no topo desses corpos de prova, enquanto que, para o mesmo período de tempo, já havia percolado nos outros.

Este fato levou à investigação da variação nos índices de vazios dos corpos de prova. Todos foram submetidos ao mesmo processo de moldagem indeformada, apresentam as mesmas dimensões, mas pesos diferentes. Com essas variáveis foi possível calcular os índices de vazios e percebeu-se uma diferença nos valores, o que justifica a passagem completa da solução por uns e a retenção por outros: alguns CP's são mais porosos. Posteriormente, na exumação dos corpos de prova, foi feita a comprovação visual dessas informações.

Embora alguns tenham apresentado maior dificuldade na percolação, todos os corpos de prova da Figura 25 (percolados) apresentaram ocorrência de biocimentação, como indicado pela análise do pH da Figura 23. Após a observação do pico de pH, os volumes percolados começam a diminuir devido ao preenchimento dos vazios pela calcita, que reduz a permeabilidade do solo. Essa diminuição foi observada na plotagem dos volumes de todos os corpos de prova submetidos à percolação.

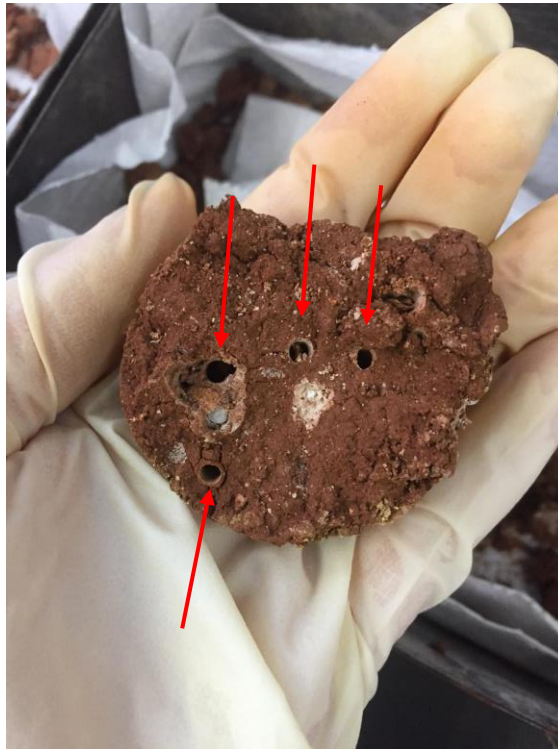
Figura 26- Volume (mL) dos lixiviados dos corpos de prova submetidos à injeção



Da mesma maneira que nos corpos de prova percolados, os injetados tiveram distinção entre os volumes lixiviados. O CP3, CP5, CP7 e CP9 apresentaram volumes bem baixos em algumas ocasiões, com destaque para o CP9, que seguiu uma tendência constante durante todo o ensaio. Por não proporcionar condições para que a solução passasse pelo maciço de solo, o CP9 também não teve picos de pH, permanecendo com leituras em torno de 4. Acredita-se que a baixa permeabilidade desse corpo de prova tenha sido a razão dele não ter biocimentado, já que não houveram condições para que os nutrientes contidos nas soluções chegassem até os microrganismos para serem sintetizados.

Com exceção do CP9, todos os demais corpos de prova submetidos à injeção apresentaram pH em torno de 8, indício de formação de calcita. Porém, como percebe-se pela análise da Figura 26, embora biocimentados, alguns corpos de prova não tiveram redução do volume lixiviado nas últimas aplicações. Isso é atribuído ao fato de que, no momento da inserção das agulhas por meio das quais as soluções foram aplicadas, ocorreu a abertura de caminhos preferenciais para passagem dos fluidos. Após exumação dos corpos de prova, foi possível identificar, em alguns, a formação do carbonato de cálcio em torno do orifício onde estava a agulha, como pode ser observado na Figura 27. Ou seja, através deste método de injeção, o biocimento não é eficiente para redução total da permeabilidade do solo, pois pode ocorrer a formação de caminhos preferenciais, como foi comprovado em alguns corpos de prova.

Figura 27 - Formação do biocimento na região de inserção da agulha em corpo de prova injetado



4.2.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado após 10 dias do término do experimento 2, ou seja, os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura durante 10 dias, dentro dos moldes, e foram extraídos manualmente no dia da realização do ensaio. A Tabela 12 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, de acordo com o método de aplicação da solução.

Os valores são variados e não apresentam tendência que possa ser atribuída ao método de aplicação. Foi realizada uma análise estatística ANOVA (com nível de significância de 0,05) para verificar o efeito do método de aplicação sobre os resultados de resistência à compressão simples, apresentada na Tabela 13. A análise estatística indicou que o método não exerce influência significativa sobre a resistência à compressão simples dos corpos de prova, dado o alto valor de p obtido, conforme se podia prever mediante observação dos resultados da Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de compressão simples

Método	Corpo de prova	Resistência à compressão (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão
Percolação	CP1	37,62	43,51	16,82
	CP2	42,61		
	CP6	85,67		
	CP8	48,95		
	CP10	40,79		
	CP11	31,73		
	CP13	38,53		
	CP16	29,46		
	CP17	36,26		
Injeção	CP3	78,87	42,36	18,69
	CP4	24,48		
	CP5	35,36		
	CP7	38,07		
	CP9	65,72		
	CP12	26,74		
	CP14	36,26		
	CP15	27,65		
	CP18	48,05		
Branco	CP19	24,93	29,01	5,77
	CP20	33,09		

Tabela 13 - Efeito do método de aplicação na resistência dos corpos de prova

Efeito	SS	MS	Graus de liberdade	F	Valor p
Intercepto	18273,07	18237,07	1	61,00048	<0,05
Método	355,09	177,55	2	0,59270	0,563860
Erro	5092,45	299,56	17	-	-

Embora quase todos os corpos de prova tenham biocimentado, os resultados do ensaio de resistência à compressão comprovam que a biocimentação não foi eficiente para melhoria do comportamento mecânico do solo em estudo. Estatisticamente, para o nível de significância de 5%, a média da resistência dos corpos de prova percolados, injetados e dos brancos (apenas com percolação de água destilada) foi igual, indicando que nem o método de aplicação e nem a própria biocimentação contribuem para alteração nos valores de resistência à compressão do solo. As amostras “branco” apresentam média de resistência inferior aos corpos de prova biocimentados, mas devido aos altos desvios padrão encontrados nos percolados e nos injetados, as três médias não apresentaram distinção estatística.

Analisando os resultados da Tabela 12, desconfia-se que há a presença de valores muito discrepantes da média e dos demais, denominados outliers, valores acima do intervalo delimitado pelos valores de desvios padrão. Com a finalidade de verificar a existência dos outliers e identificá-los, foi elaborado um Diagrama de Caixa, também conhecido como Boxplot. Conforme Bussad (2010), o boxplot é um gráfico formado por uma caixa construída pelo primeiro quartil (Q1) até o terceiro quartil (Q3) dos dados e com uma linha na posição da mediana. Linhas perpendiculares verticais, denominadas fios de bigode ou Whiskers, cortam a caixa e fornecem informações sobre a dispersão dos dados. Para determinação do valor mínimo do Whisker, escolhe-se o maior valor entre (BUSSAD, 2010):

- I. Menor valor das medidas válidas (dados);
- II. $Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)$.

Já para definir o maior valor do Whisker, escolhe-se o menor valor entre:

- I. Maior valor das medidas válidas (dados);
- II. $Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)$.

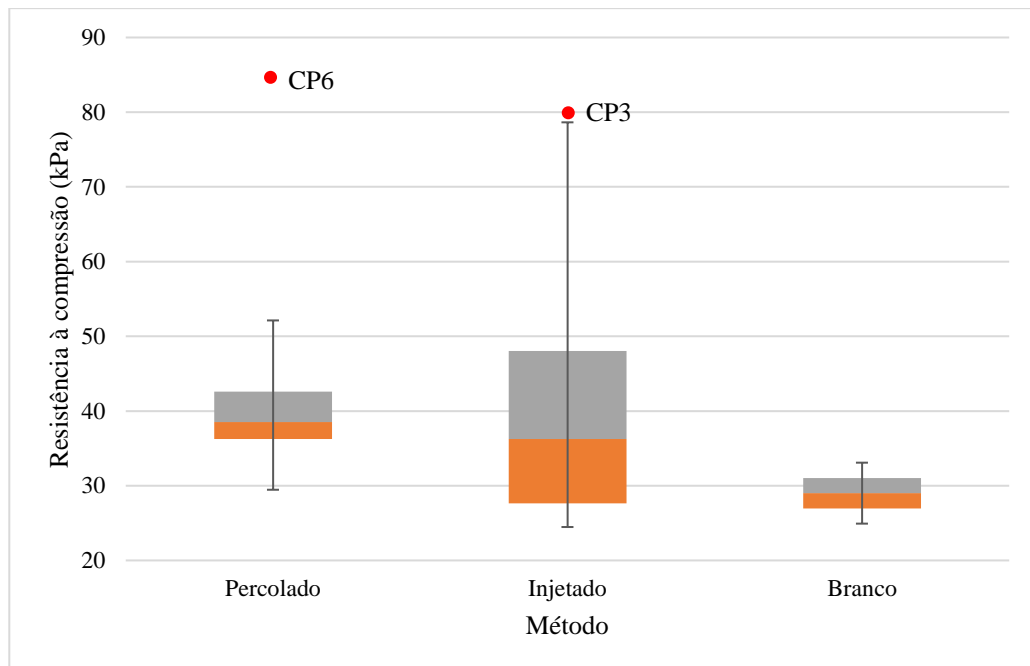
Os valores denominados outliers são aqueles que se encontram fora dos limites do Whisker. Com os dados da Tabela 13, foi gerado um primeiro boxplot, denominado boxplot 1, que apontou como outliers os resultados de compressão do CP3 (78,87kPa) e do CP6 (85,67kPa). Ambos os valores foram retirados e foi realizada nova análise, denominada boxplot 2, que indicou o CP9 (65,72kPa) como outlier. Após retirada do CP9, foi realizada outra análise, denominada boxplot 3, que não indicou a presença de outliers. Os dados relativos à mediana, quartil 1 (Q1), quartil 3 (Q3), valor máximo, valor mínimo e limites do Whisker das 3 análises são apresentados na Tabela 14, enquanto que os gráficos das análises boxplot 1, boxplot 2 e boxplot 3 são apresentados, respectivamente, na Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

No caso do boxplot 1, apresentado na Figura 28, para os corpos de prova percolados, o limite superior do Whisker foi de 52,13kPa, classificando o CP6 (85,67kPa), que aparece em vermelho na figura, como outlier. Para as amostras injetadas, o CP3 (78,87kPa) classificou-se como outlier, ficando ligeiramente acima do limite superior do Whisker, de 78,64kPa. As amostras branco não apresentam outliers e o diagrama de caixas aparece para representação e não para análise, já que a população é composta por apenas 2 amostras.

Tabela 14 - Resultados das análises boxplot

Análise		Mediana	Q1	Q3	Máximo	Mínimo	Whisker inferior	Whisker superior
Boxplot 1	Perc.	38,53	36,26	42,61	85,67	29,46	29,46	52,13
	Inj.	36,26	27,65	48,05	78,87	24,48	24,48	78,64
	Branco	29,01	26,97	31,05	33,09	24,93	24,93	33,09
Boxplot 2	Perc.	38,07	35,13	41,25	48,95	29,46	29,46	48,95
	Inj.	35,81	27,42	40,57	65,72	24,48	24,48	60,29
	Branco	29,01	26,97	31,05	33,09	24,93	24,93	33,09
Boxplot 3	Perc.	38,07	35,13	41,25	48,95	29,46	29,46	48,95
	Inj.	35,36	27,20	37,17	48,05	24,48	24,48	48,05
	Branco	29,01	26,97	31,05	33,09	24,93	24,93	33,09

Figura 28 - Boxplot 1 com outliers



Para o boxplot 2, apresentado na Figura 29, as amostras percoladas não apresentaram outliers, já que todos os dados estavam contidos dentro dos limites do Whisker, que variou entre 29,46kPa e 48,95kPa. No caso dos corpos de prova injetados, o CP9 (65,72kPa) configurou-se como outlier, ficando acima do limite superior do Whisker de 60,29 kPa.

Figura 29 - Boxplot 2 com outliers

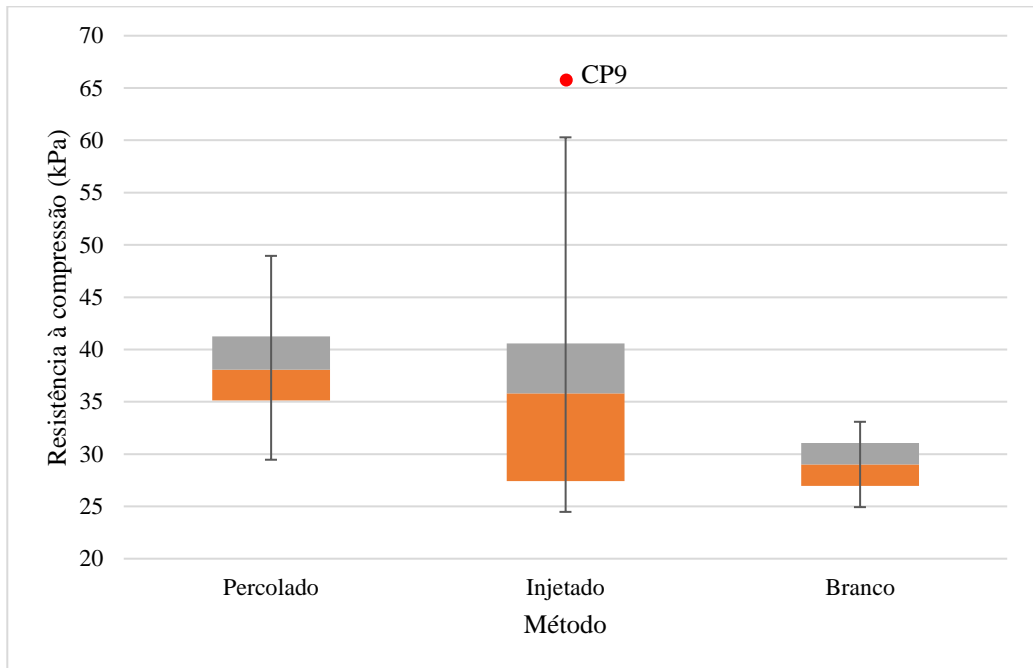
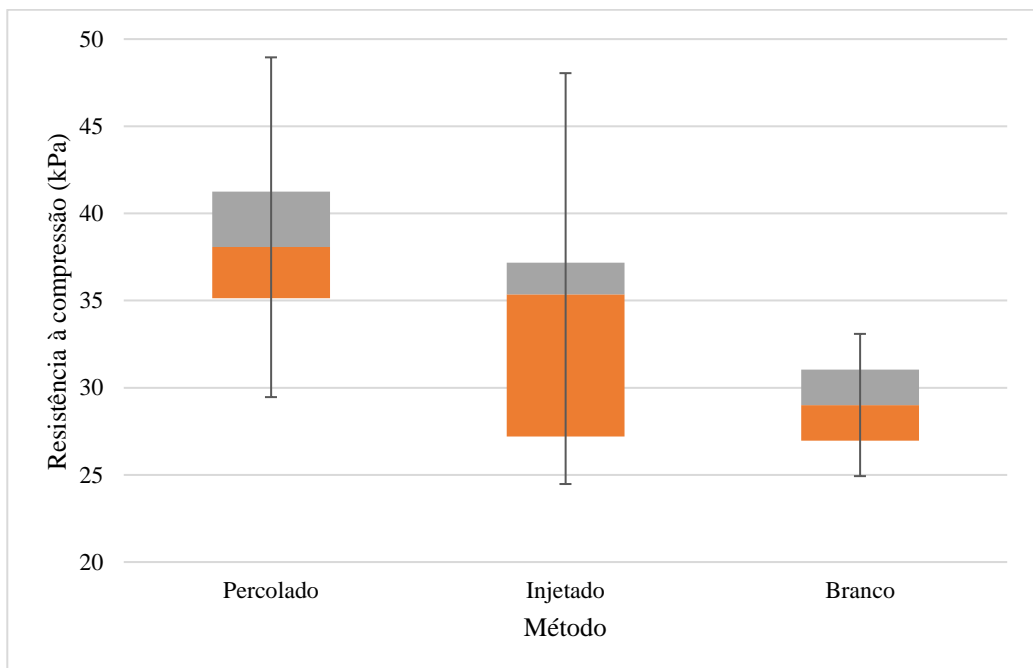


Figura 30 - Boxplot 3 sem outliers



Por fim, os resultados do boxplot 3, na Figura 30, não trouxeram nenhum outlier, já que todos os dados das amostras percoladas e injetadas se enquadraram dentro dos intervalos de Whisker. Portanto, a partir da análise dos diagramas de caixa gerados, foram detectados 3 outliers: CP3, CP6 e CP9, dados que foram retirados das populações amostrais e foram

recalculadas suas médias e desvios padrão, apresentados na Tabela 15. Com os dados da Tabela 15, foi realizada nova análise estatística ANOVA, apresentada na Tabela 16, para avaliar o efeito do método de aplicação nos resultados de resistência à compressão.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de compressão simples (sem outliers)

Método	Corpo de prova	Resistência à compressão (kPa)	Média (kPa)	Desvio padrão
Percolação	CP1	37,62	38,24	6,14
	CP2	42,61		
	CP8	48,95		
	CP10	40,79		
	CP11	31,73		
	CP13	38,53		
	CP16	29,46		
	CP17	36,26		
Injeção	CP4	24,48	33,80	8,21
	CP5	35,36		
	CP7	38,07		
	CP12	26,74		
	CP14	36,26		
	CP15	27,65		
	CP18	48,05		
Branco	CP19	24,93	29,01	5,77
	CP20	33,09		

Tabela 16 - Efeito do método de aplicação na resistência dos corpos de prova (sem outliers)

Efeito	SS	MS	Graus de liberdade	F	Valor p
Intercepto	13299,56	13299,56	1	265,328	<0,05
Método	164,23	82,12	2	1,6382	0,229466
Erro	701,75	50,12	14	-	-

Mesmo com a exclusão dos valores que estavam fugindo à tendência dos dados, a análise continuou apontando a variável “método” como insignificante para os resultados de resistência à compressão das amostras. O valor p teve redução em relação ao encontrado na análise anterior, mas permaneceu acima do limite para ser considerado significativo. Portanto, em ambas as análises (com outliers e sem outliers) o método de aplicação não exerce influência sobre os resultados, nem mesmo a biocimentação, visto que as amostras “branco” apresentam média de resistência estatisticamente igual às demais.

Como a biocimentação não é o fator responsável pelos resultados de resistência à compressão das amostras, acredita-se que os valores se devem à própria estrutura do solo, o que pode ser comprovado, também, pela forma de ruptura dos corpos de prova, apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Forma de ruptura dos corpos de prova: a) CP3; b) CP6; c) CP9 e d) CP20



A Figura 31 – “a” traz o modo de ruptura do CP3, corpo de prova que apresentou o maior valor de resistência à compressão dentre os injetados. Constata-se que não houve um plano de ruptura bem definido, e o corpo de prova cedeu mediante esmagamento do terço inferior. O CP6, que obteve o maior resultado de resistência dentre os corpos de prova

percolados, é apresentado na Figura 31 – “b”, também sem plano de ruptura definido, com rachaduras distribuídas de forma aleatória e início de esmagamento.

A Figura 31 – “c” traz o modo de ruptura do CP9, corpo de prova submetido à injeção que não apresentou leituras de pH superiores a 4 e, conseqüentemente, não teve formação de calcita. Para este corpo de prova, é visível a forma de ruptura por esmagamento, apresentando grandes deformações visuais. Por fim, a Figura 31 – “d” representa a ruptura do CP20, corpo de prova branco submetido à percolação de água destilada. Nesse caso, a ruptura se deu por esmagamento do terço superior do corpo de prova, com diversas rachaduras distribuídas de forma aleatória.

Destaca-se, mediante observação dos modos de ruptura da Figura 31, que os corpos de prova biocimentados (Figura 31 – “a” e “b”) apresentaram tendência de rompimento por esmagamento do terço inferior, sem grandes deformações visíveis no terço superior, região onde supõe-se ter ocorrido a maior formação de calcita, por ser mais próxima do ponto de aplicação. Os corpos de prova não biocimentados (Figura 31 – “c” e “d”) romperam por esmagamento uniforme em toda sua extensão, inclusive no topo. Esses padrões de ruptura, tanto dos biocimentados quanto dos não biocimentados, foram observados, também, para os demais corpos de prova.

Com base nos modos de ruptura das amostras, acredita-se que, embora não tenha ocorrido em quantidade suficiente e de maneira satisfatoriamente homogênea para aumentar a resistência mecânica do solo, a biocimentação foi responsável por impedir o esmagamento do terço superior dos corpos de prova. Já é fato conhecido que, conforme aumenta a profundidade da amostra, a homogeneidade da precipitação diminui (PORTUGAL et al., 2020), pois há mais dificuldade dos líquidos alcançarem grandes profundidades, ainda mais em solos de grãos finos, como é o caso do solo em estudo. O biocimento formado no terço superior das amostras garantiu que esta não fosse a primeira região a romper durante a compressão, fato comprovado pela tendência de esmagamento da porção inferior dos corpos de prova biocimentados.

Buscando uma justificativa para os diferentes resultados de resistência à compressão dos corpos de prova, já que a biocimentação não foi o fator responsável, investigou-se o índice de vazios das amostras, visto que todas elas foram obtidas de maneira indeformada e foram moldadas nas mesmas dimensões, mas apresentaram pesos diferentes. Com os dados de umidade, peso e volume das amostras, foi possível calcular seus índices de vazios. Para tanto, foi elaborada a Tabela 17, que traz os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova em função dos índices de vazios.

Tabela 17 - Resistência à compressão e índices de vazios dos corpos de prova

Corpo de prova	Resistência à compressão (kPa)	Índice de vazios
CP1	37,62	1,09
CP2	42,61	1,00
CP3	78,87	0,90
CP4	24,48	1,07
CP5	35,36	0,91
CP6	85,67	0,87
CP7	38,07	0,88
CP8	48,95	0,98
CP9	65,72	0,89
CP10	40,79	1,05
CP11	31,73	1,10
CP12	26,74	1,11
CP13	38,53	0,94
CP14	36,26	1,08
CP15	27,65	1,11
CP16	29,46	0,98
CP17	36,26	0,85
CP18	48,05	1,02
CP19	24,93	0,99
CP20	33,09	1,21

Os índices variaram de 0,85 a 1,21. Em linhas gerais, os corpos de prova com maiores valores de resistência à compressão (CP3, CP6 e CP9), classificados como outliers, possuem índices de vazios inferiores a 0,90. Com algumas exceções, a tendência das amostras com menores resultados de resistência à compressão é apresentar índices de vazios próximos ou superiores a 1,0. Em valores absolutos, considerando o solo em análise e o volume dos corpos de prova, que é de 177,2cm³, um índice de vazios igual ou inferior a 0,90 indica a existência de mais volumes de sólidos do que de vazios, enquanto que um índice superior a 1,05 aponta o predomínio de volumes de vazios em detrimento dos sólidos.

A fim de procurar uma correlação estatística entre o índice de vazios e o resultado de resistência à compressão dos corpos de prova, foi realizada uma análise de correlação de Pearson no software Statistica. Segundo Filho e Júnior (2009), o coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre duas variáveis, e varia de -1 a 1. Quanto mais próximo dos valores máximos (-1 ou 1), maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis, e quanto mais próximo de zero, menor é a correlação. O sinal representa a

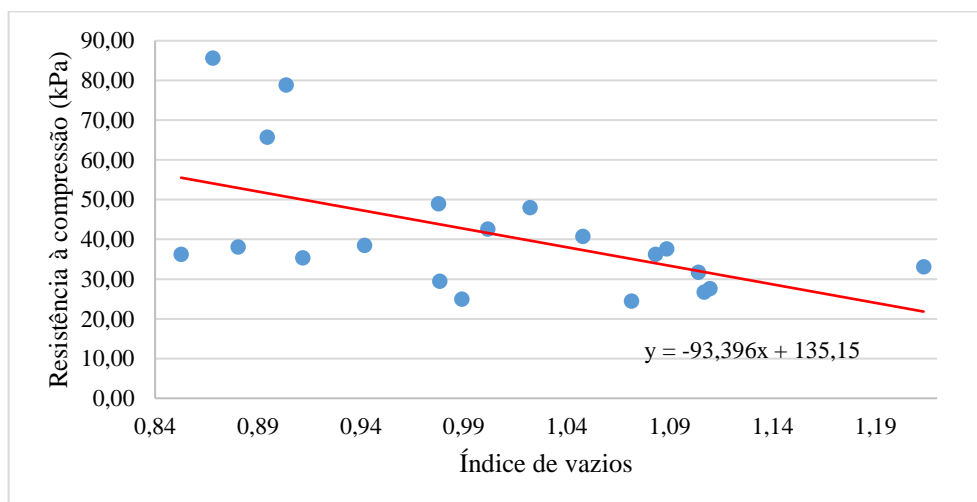
direção da correlação: sinal positivo indica que as variáveis tendem a aumentar ou diminuir em conjunto, e sinal negativo indica que, enquanto uma variável aumenta, a outra diminui.

Os dados da Tabela 18 foram testados sob nível de significância de 0,05 e o resultado foi um coeficiente de correlação de Pearson r igual a -0,549, com um valor p igual a 0,012, indicando alta significância da correlação. De acordo com Filho e Júnior (2009), há algumas divergências entre os pesquisadores a respeito da magnitude dos coeficientes: Cohen (1988, apud FILHO E JÚNIOR, 2009) classificam como pequenos os valores entre 0,10 e 0,29, moderados entre 0,30 e 0,49 e grandes entre 0,50 e 1,0; já Dancey e Reidy (2005, apud FILHO E JÚNIOR, 2009) trazem como fracos os escores entre 0,10 e 0,30, médios entre 0,40 e 0,60 e fortes entre 0,70 e 1,0.

Por ser uma convenção mais atual, decidiu-se adotar a interpretação de Dancey e Reidy (2005, apud FILHO E JÚNIOR, 2009), considerando o coeficiente r obtido, de -0,549, como um valor correspondente a uma correlação linear moderada. O sinal negativo indica, nesse caso, que as variáveis possuem uma correlação inversa: valores pequenos de índices de vazios tendem a apresentar maiores resistências à compressão, e vice versa. Os resultados são coerentes com as interações físico-mecânicas já conhecidas em geotecnia, onde baixos índices de vazios indicam materiais mais densos ou melhor compactados e, conseqüentemente, com maior resistência mecânica.

O gráfico que correlaciona a resistência à compressão das amostras em função do índice de vazios está apresentado na Figura 32. Os dados estão plotados com a linha de tendência e sua respectiva equação linear que traz o índice de vazios como variável independente (x) e a resistência à compressão como variável dependente (y).

Figura 32 - Resistência à compressão em função do índice de vazios das amostras



A reta que representa a correlação linear dos dados é decrescente, como é demonstrado pelo coeficiente r negativo e pelo elemento “ a ” da equação obtida, também negativo. Em resumo, a equação apresentada na Figura 32 representa os dados com um índice de confiança correspondente ao coeficiente r de -0,549, que considera as variâncias dos dados, representando uma correlação de magnitude moderada. Isso indica que é possível atribuir aos índices de vazios as variações dos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova, ou seja, a própria estrutura do solo foi o fator responsável pelos resultados de resistência apresentados, sem influência da biocimentação.

4.2.2 Exumação dos corpos de prova

Após rompimento dos corpos de prova na prensa, eles foram exumados mediante separação em 3 partes: terço superior, terço médio e terço inferior, como pode ser conferido na Figura 33. A iniciativa de separar as amostras em 3 partes partiu do pressuposto de que a biocimentação não ocorreu de maneira homogênea nos corpos de prova, podendo haver maior ou menor concentração de calcita conforme a profundidade.

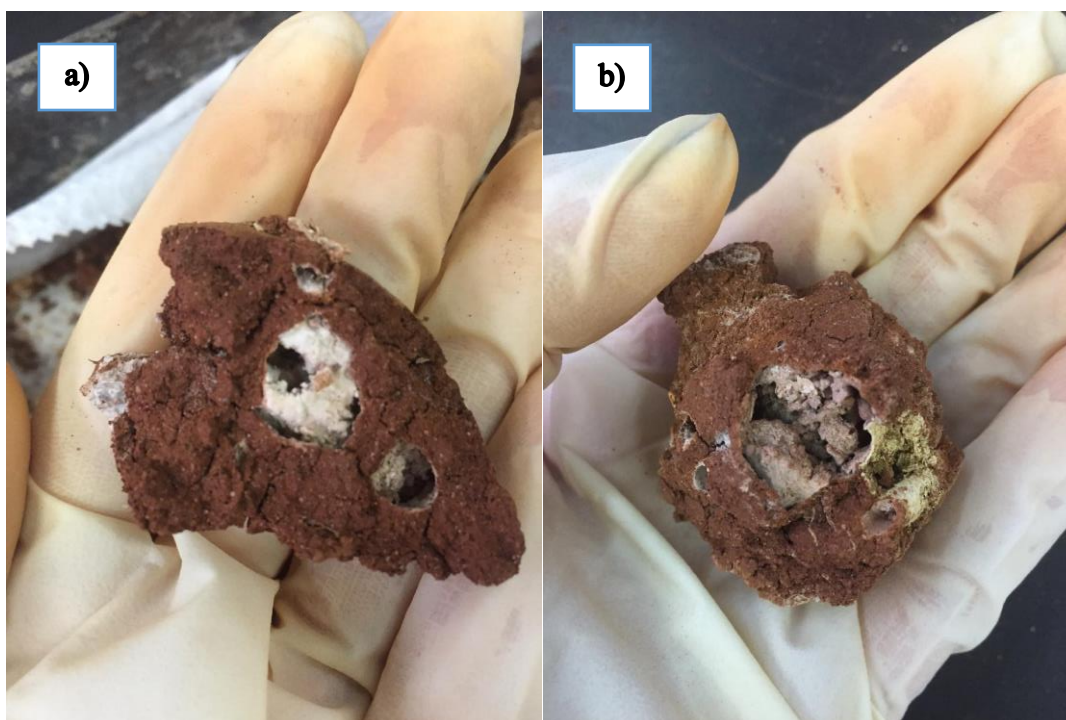
Figura 33 - Corpo de prova exumado em terço superior, médio e inferior



Durante a exumação, foi possível observar algumas peculiaridades nas amostras, como a presença de grandes espaços vazios em alguns corpos de prova, o que justifica os diferentes

índices de vazios calculados. Em alguns casos, foi nesses vazios maiores que ocorreu a precipitação concentrada do biocimento, como no caso da Figura 34 – “a”. A Figura 34 – “b” apresenta um vazio onde é visível a formação da calcita, porém sem preenchimento do espaço, havendo precipitação ao redor dos grãos de solo.

Figura 34 - Formação de calcita: a) concentrada nos vazios; b) em torno do solo



Após exumação, os corpos de prova foram deixados para secar ao ar, em ambiente interno, durante 72 horas. Os ensaios de difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e espectroscopia de infravermelho (FTIR) foram realizados com amostras retiradas dos 3 terços (superior, médio e inferior), mais a amostra branco como referência. A nomenclatura utilizada para identificar as amostras nos próximos ensaios está apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 - Nomenclatura das amostras

Amostra	Percolação	Injeção	Branco
Terço superior	P1	I1	REF
Terço médio	P2	I2	
Terço inferior	P3	I3	

4.2.3 Difração de raios X (DRX) e Fluorescência de raios X (FRX)

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX), por estarem diretamente relacionados. A nomenclatura utilizada nas amostras foi apresentada na Tabela 18, e composição das amostras consistiu na escolha de corpos de prova de cada método, conforme critérios explicados na sequência. Para os percolados, foram selecionados o CP1, CP6 e CP10, e para os injetados, o CP3, CP14 e CP18. As amostras consistiram na mistura de material proveniente de cada camada (terço superior, médio e inferior) dos 3 corpos de prova de cada método, compondo amostras representativas.

O critério de escolha dos corpos de prova, a princípio, partiria dos resultados do ensaio de compressão simples. Como o ensaio não se mostrou capaz de classificar as amostras em relação à eficiência da biocimentação, os corpos de prova foram escolhidos conforme análise do pH durante a realização da precipitação (amostras que apresentaram pH estável superior a 8), e mediante observações visuais após exumação.

O resultado do ensaio DRX para os percolados está apresentado na Figura 35. Foram plotados os resultados referentes ao terço superior (P1), terço médio (P2), terço inferior (P3) e a amostra branco (REF). Os 4 gráficos aparecem plotados juntos para fins de comparação. A identificação dos elementos presentes nas amostras foi realizada pelo Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul (CT Pedras) do Campus Soledade da Universidade de Passo Fundo, com adição de algumas informações elaboradas pela autora.

Foi identificada a presença de quartzo ($2\theta=26,7^\circ$; $2\theta=21^\circ$; $2\theta=50,3^\circ$ e $2\theta=68,1^\circ$), hematita ($2\theta=34,6^\circ$) e caulinita ($2\theta=12,8^\circ$) na amostra referência, ou seja, o solo natural. Esses minerais também aparecem em todas as amostras percoladas, com pequenas alterações de pico. O diferencial foi a presença de calcita ($2\theta=29,4^\circ$) nas amostras percoladas, o que não ocorre no solo natural, como era o esperado. A Figura 36 apresenta os mesmos dados da Figura 35, porém com um zoom realizado no eixo “x”, a fim de proporcionar uma melhor visualização da região de identificação da calcita.

Figura 35 - Difração de raios X (DRX) para os percolados

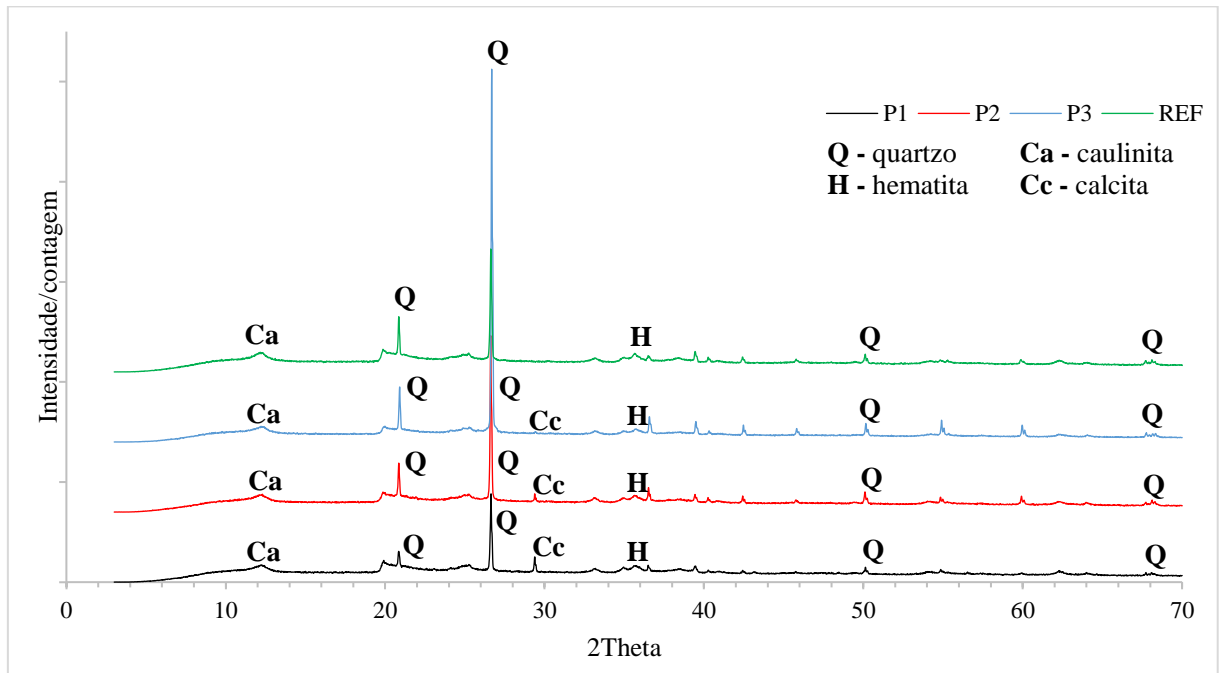
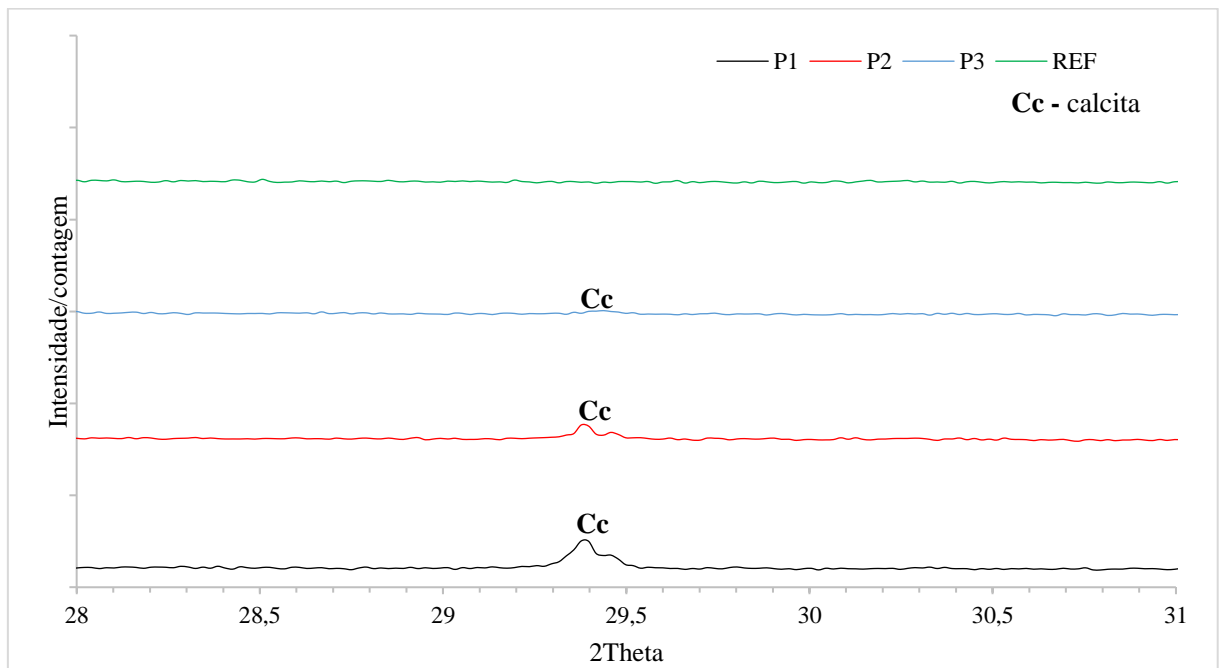


Figura 36 - Difração de raios X (DRX) na região da calcita para os percolados



A Figura 36 mostra a diferença das intensidades dos picos de identificação da calcita nos 3 terços dos corpos de prova percolados. No terço superior (P1), observa-se um pico mais pronunciado, que diminui de intensidade no terço médio (P2), e mais ainda no terço inferior (P3), ficando quase imperceptível. A intensidade dos picos relaciona-se com a quantidade de

calcita presente nas amostras, o que indica, nesse caso, que a precipitação foi menos eficiente com o aumento da profundidade. Esse resultado corrobora a ideia levantada mediante observação dos padrões de ruptura dos corpos de prova biocimentados, que apresentaram tendência de rompimento preferencialmente a partir do terço médio. Com isso, conclui-se que a solução não conseguiu percolar de maneira homogênea pelos corpos de prova, encontrando mais dificuldade nas profundidades maiores. A amostra referência aparece como parâmetro comparativo, demonstrando que o solo natural não possui calcita em sua composição.

Complementarmente à análise DRX, o ensaio FRX traz a composição química quantitativa das amostras de solo, sendo os resultados expressos em porcentagem de óxidos. Esse ensaio também foi realizado com amostras obtidas dos 3 terços (superior, médio e inferior) dos corpos de prova, mais a amostra referência. A Tabela 19 apresenta a composição química obtida das amostras percoladas e da amostra referência. O ensaio foi realizado em duplicata e a quantidade, expressa em porcentagem, representa a média obtida de cada par de dados.

Tabela 19 - Fluorescência de raios X (FRX) para os percolados

P1		P2		P3		REF	
Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)
SiO ₂	43,52	SiO ₂	41,77	SiO ₂	50,39	SiO ₂	51,24
Al ₂ O ₃	30,57	Al ₂ O ₃	24,20	Al ₂ O ₃	25,70	Al ₂ O ₃	32,89
Fe ₂ O ₃	11,99	Fe ₂ O ₃	14,12	Fe ₂ O ₃	10,52	Fe ₂ O ₃	11,05
Cl	5,21	Cl	12,55	Cl	6,90	TiO ₂	2,13
CaO	3,55	TiO ₂	2,42	TiO ₂	2,05	MgO	1,40
TiO ₂	2,25	CaO	1,90	CaO	1,87	Outros	1,29
MgO	1,45	MgO	1,45	MgO	1,35		
Outros	1,48	Outros	1,60	Outros	1,24		

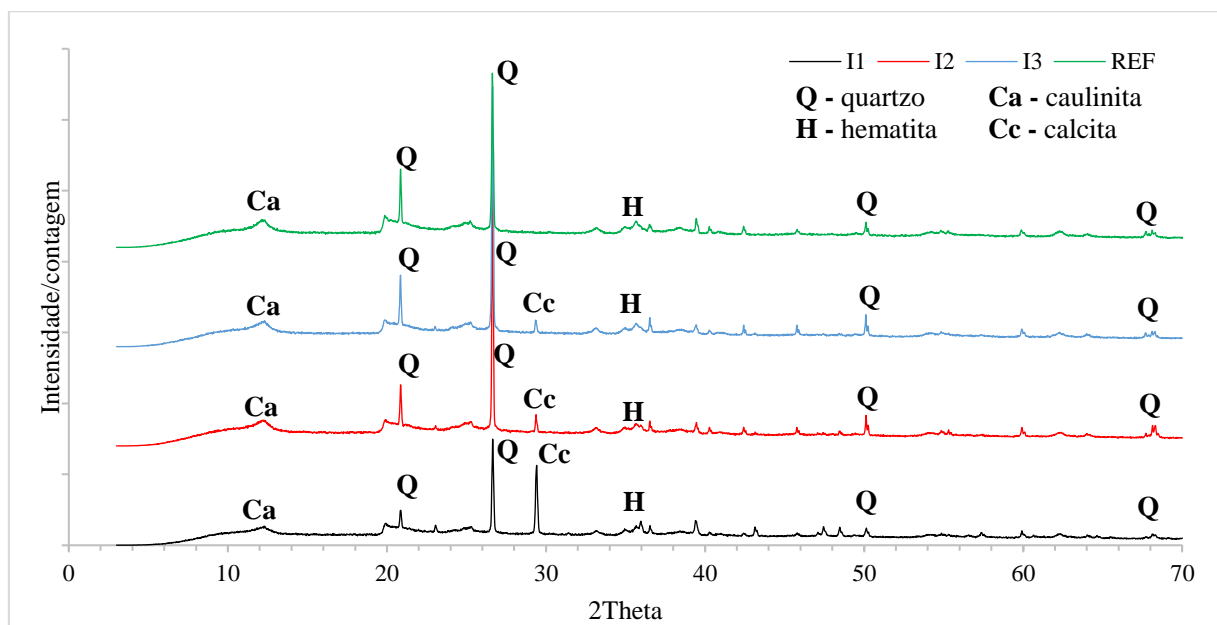
Os resultados da análise FRX corroboram os dados obtidos do ensaio de difração. O dióxido de silício (SiO₂), encontrado em quantidade abundante em todas as amostras, é um composto químico que pode assumir diversas formas cristalinas, entre elas o quartzo, que foi o mineral detectado com maior pico de intensidade na análise DRX. O óxido de alumínio (Al₂O₃) representa a detecção da caulinita (Si₂Al₂O₅(OH)₄), e o óxido de ferro (Fe₂O₃) corresponde à hematita, ambos os minerais também identificados no difratograma. O quartzo, a caulinita e a hematita são componentes comumente encontrados em solos derivados de rochas basálticas

(VENDRAME et al., 2015), como é o caso do solo em estudo, o que justifica sua detecção nas amostras de referência. Também foram detectados dióxido de titânio (TiO₂) e óxido de magnésio (MgO) como componentes do solo natural.

Os elementos que diferenciam a composição FRX das amostras biocimentadas em relação às amostras naturais são o cloro (Cl) e o óxido de cálcio (CaO). O cloro é proveniente do cloreto de cálcio (CaCl₂), um dos componentes da solução de alimentação utilizada para incentivar a biocimentação. Já o óxido de cálcio, apresentado em vermelho na Tabela 20, representa o carbonato de cálcio (CaCO₃), a própria calcita, produto final objeto de análise. O óxido de cálcio é encontrado em quantidade superior na amostra I1 (3,55%) em relação às amostras I2 (1,90%) e I3 (1,87%), comprovando a diminuição da precipitação da calcita com o aumento da profundidade.

Em relação às amostras injetadas, os resultados do ensaio de difração são apresentados na Figura 37. Foram identificados os mesmos minerais das amostras percoladas: quartzo ($2\theta=26,7^\circ$; $2\theta=21^\circ$; $2\theta=50,3^\circ$ e $2\theta=68,1^\circ$), hematita ($2\theta=34,6^\circ$) e caulinita ($2\theta=12,8^\circ$), já que são componentes provenientes do solo. A presença da calcita ($2\theta=29,4^\circ$) foi detectada nas amostras biocimentadas I1, I2 e I3, mas não no solo natural. A Figura 38 apresenta os mesmos dados da Figura 37, com destaque na região de identificação da calcita.

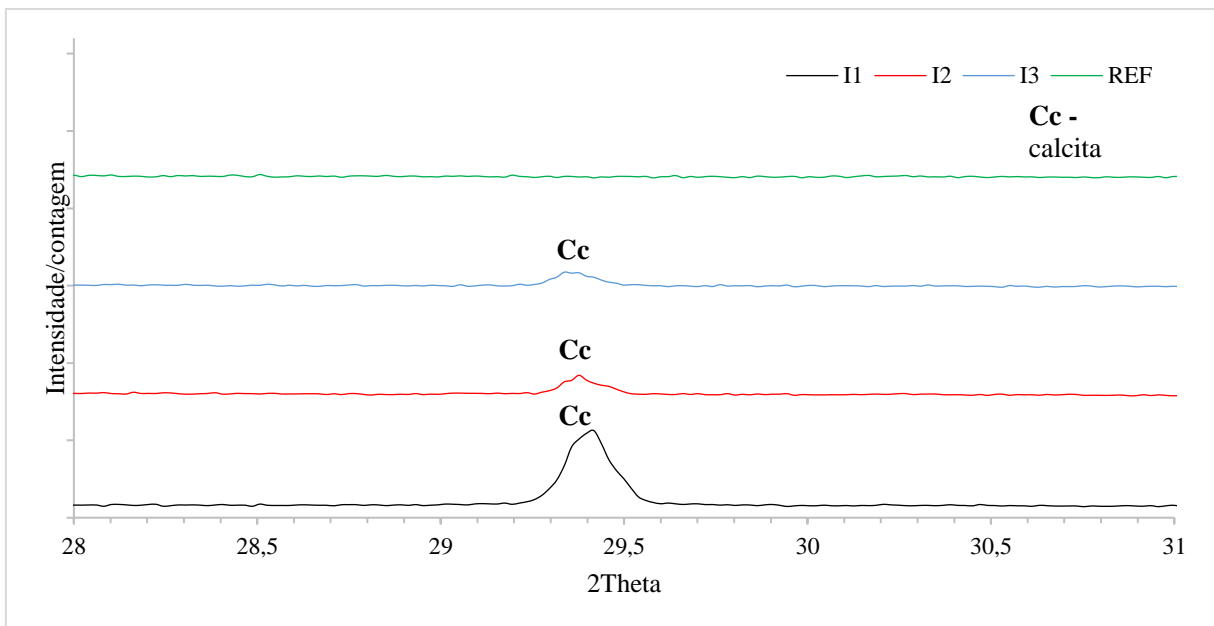
Figura 37 - Difração de raios X (DRX) para os injetados



Da mesma maneira que nas amostras percoladas, percebe-se um pico mais intenso de calcita no terço superior dos corpos de prova injetados (I1) na Figura 38, intensidade que vai

reduzindo conforme aumenta a profundidade, como mostram as linhas I2 e I3, embora estas últimas se assemelhem. O método de injeção, da mesma forma que a percolação, encontra dificuldades para promover a precipitação de calcita com o aumento da profundidade dos corpos de prova. Apesar das soluções terem sido aplicadas com o uso de agulhas inseridas no solo, houve dificuldade de injetar o líquido, conforme já descrito na metodologia, dado que este preenchia a amostra de baixo para cima até sua saturação, e após acumulava sobre o topo.

Figura 38 - Difração de raios X (DRX) na região da calcita para os injetados



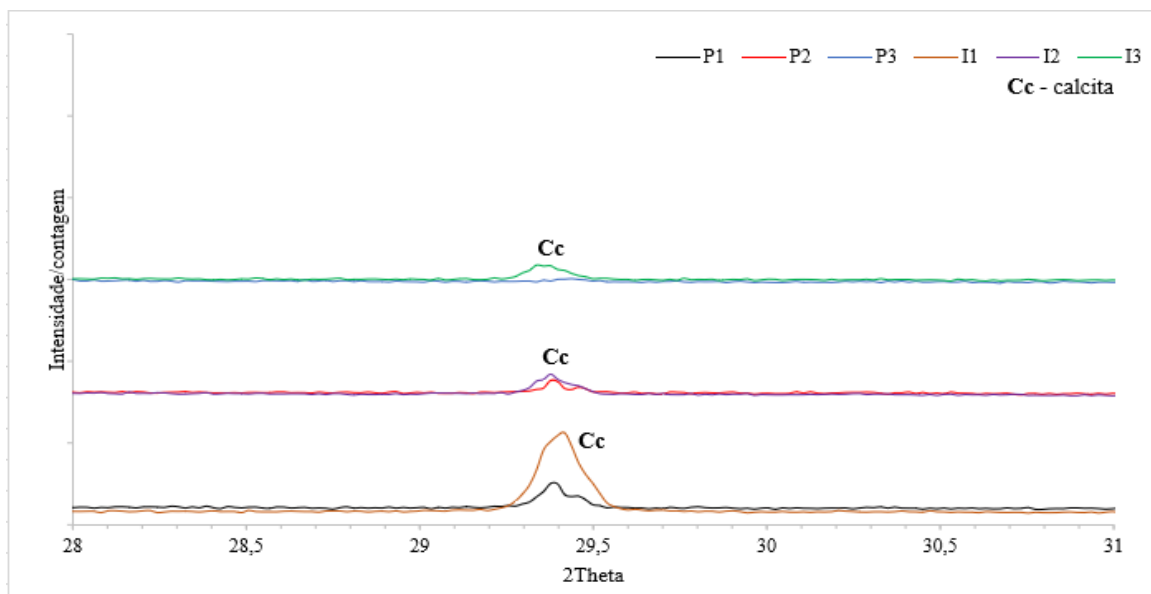
O resultado do ensaio FRX das amostras injetadas pode ser conferido na Tabela 20. Foram identificados o dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) proveniente da caulinita, óxido de ferro (Fe_2O_3) da hematita, dióxido de titânio (TiO_2) e óxido de magnésio (MgO), todos elementos encontrados no solo. Os componentes cloro (Cl) e óxido de cálcio (CaO) provenientes da biocimentação são identificados nas amostras I1, I2 e I3, sendo a quantidade detectada em I1, de 16,81%, cerca de 4 vezes superior às encontradas em I2 e I3, de 4,34% e 4,22%, respectivamente.

Tabela 20 - Fluorescência de raios X (FRX) para os injetados

I1		I2		I3		REF	
Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)	Elemento	Qtde (%)
SiO2	28,90	SiO2	42,27	SiO2	41,98	SiO2	51,24
Cl	19,91	Al2O3	23,17	Al2O3	23,50	Al2O3	32,89
Al2O3	17,77	Fe2O3	13,23	Fe2O3	14,69	Fe2O3	11,05
CaO	16,81	Cl	11,48	Cl	9,77	TiO2	2,13
Fe2O3	12,53	CaO	4,34	CaO	4,22	MgO	1,40
TiO2	2,49	TiO2	2,59	TiO2	2,74	Outros	1,29
K2O	0,53	MgO	1,40	MgO	1,55		
Outros	1,08	Outros	1,53	Outros	1,56		

A fim de comparar a formação de biocimento dos corpos de prova percolados e dos injetados, foi elaborada a Figura 39, que une os difratogramas dos 3 terços das amostras de ambos os métodos, com destaque para a região de localização da calcita, em $2\theta=29,4^\circ$. A figura evidencia o pico mais intenso de I1 em relação a P1, indicando uma maior formação de carbonato de cálcio no terço superior dos corpos de prova injetados em relação aos percolados. O terço médio, representado por I2 e P2, aparece praticamente igual para ambos os métodos, e no terço inferior, o I3 apresenta-se superior ao P3, indicando que, aparentemente, a injeção se mostrou mais eficiente para precipitação de calcita na porção inferior dos corpos de prova, quando comparada com a percolação.

Figura 39 - Comparação dos difratogramas das amostras percoladas e injetadas



Por fim, foi elaborada a Tabela 21, que compara os resultados da análise FRX para ambos os métodos, percolação e injeção, em relação à quantidade de óxido de cálcio (CaO) encontrada nas 3 camadas analisadas. Percebe-se que o método de injeção proporcionou uma maior precipitação de calcita (representada pela quantidade de CaO) nas 3 camadas analisadas, sendo que, no terço superior, a quantidade das amostras injetadas foi cerca de 4,7 vezes superior às percoladas, e nos terços médio e inferior foi cerca de 2,2 vezes maior.

Tabela 21 - Comparação da quantidade de CaO das amostras percoladas e injetadas

Região	Quantidade de CaO (%)	
	Percolação	Injeção
Terço superior (P1, I1)	3,55	16,81
Terço médio (P2, I2)	1,90	4,34
Terço inferior (P3, I3)	1,87	4,22

4.2.4 Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

Neste item, serão apresentados os resultados do ensaio de espectroscopia de infravermelho (FTIR). A nomenclatura utilizada nas amostras é a da Tabela 18, a mesma utilizada nos ensaios DRX e FRX. A composição das amostras também consistiu no CP1, CP6 e CP10 para os percolados, e CP3, CP14 e CP18 para os injetados. Os resultados de FTIR para as amostras percoladas e para a amostra referência está apresentado na Figura 40, e para as amostras injetadas e a referência, na Figura 41.

Conforme Nguyen et al. (1991), o intervalo de vibrações do radical hidroxila localiza-se na região entre 3600cm^{-1} e 3700cm^{-1} , mais especificamente nas bandas de 3622cm^{-1} , 3655cm^{-1} , 3672cm^{-1} e 3698cm^{-1} . As ligações de alumínio e sílica podem ser encontradas entre 800cm^{-1} e 1200cm^{-1} . Outras variações de bandas nesse mesmo intervalo, juntamente com as encontradas entre $3600\text{-}3700\text{cm}^{-1}$ são utilizadas para identificação de minerais de caulim (NGUYEN et al., 1991), nesse caso, a caulinita.

Ligações de SiO_2 são encontradas nas frequências de 1080cm^{-1} , 700cm^{-1} e próximas de 780cm^{-1} . Minerais de quartzo apresentam bandas em torno de 1650cm^{-1} , podendo se estender até 2000cm^{-1} (NGUYEN et al., 1991). Os picos mais proeminentes detectados no gráfico se situam na faixa entre 800cm^{-1} e 1200cm^{-1} , sendo o intervalo $1090\text{-}1200\text{cm}^{-1}$ característico de vibrações de estiramento Si – O (KAUR e GOYAL, 2016). Ainda no mesmo intervalo de 800-

1200cm^{-1} , encontra-se a frequência de vibração da hematita, de 915cm^{-1} (NAYAK e SINGH, 2007).

Todas as bandas citadas são referentes aos minerais do próprio solo, que já haviam sido detectados por meio dos ensaios DRX e FRX, e aparecem tanto nas amostras biocimentadas (P1, P2, P3, I1, I2 e I3) quanto no solo natural (REF). O diferencial se encontra em torno da banda de 1450cm^{-1} , representada em vermelho nas Figuras 40 e 41 e que, segundo Nguyen et al. (1991), se refere à presença de carbonato, e é localizada apenas nos espectros das amostras biocimentadas. Esse é o indicativo da presença do carbonato de cálcio, comprovando novamente a ocorrência da biocimentação.

Figura 40 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) para os percolados

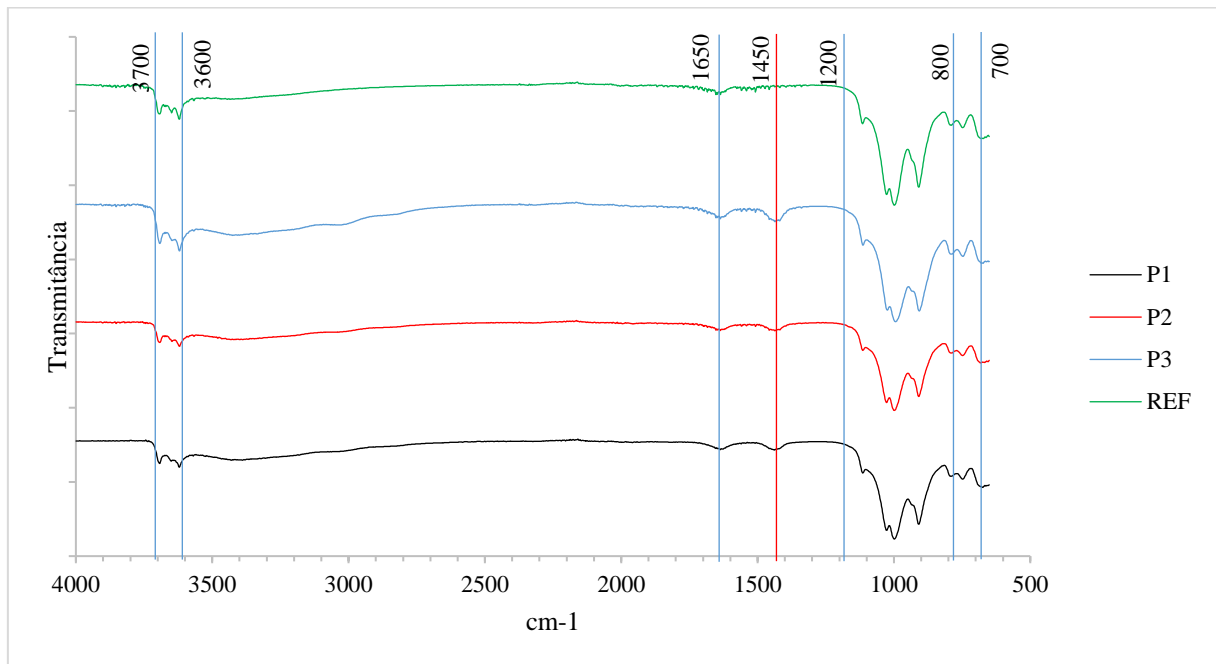
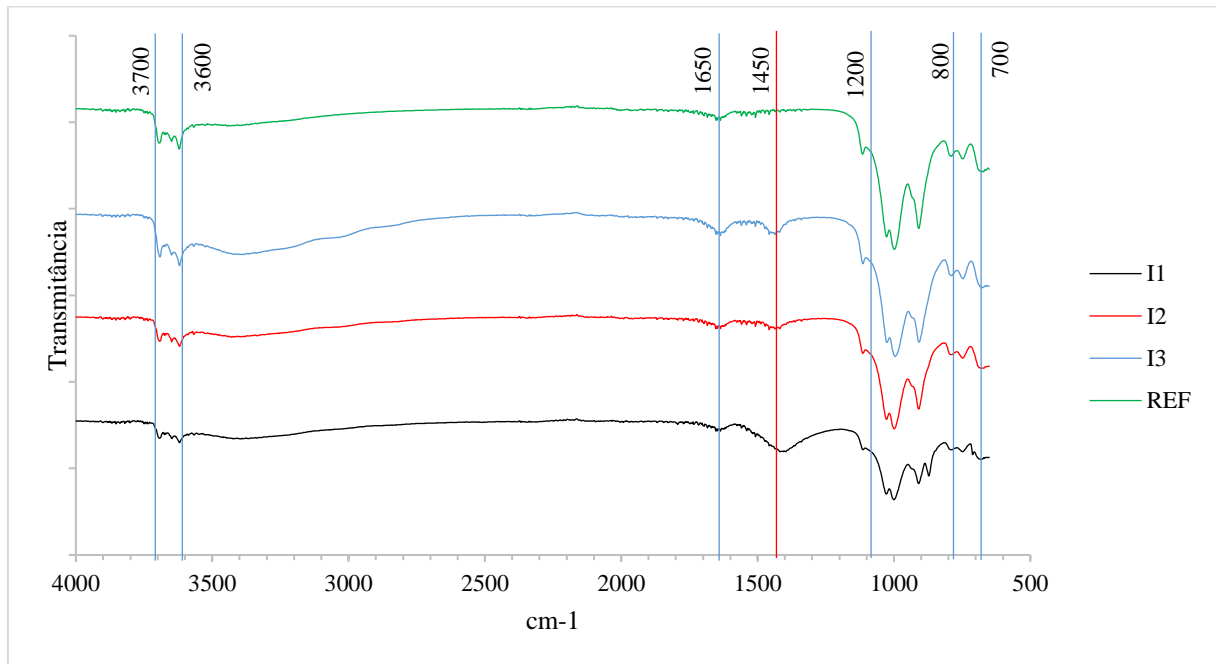


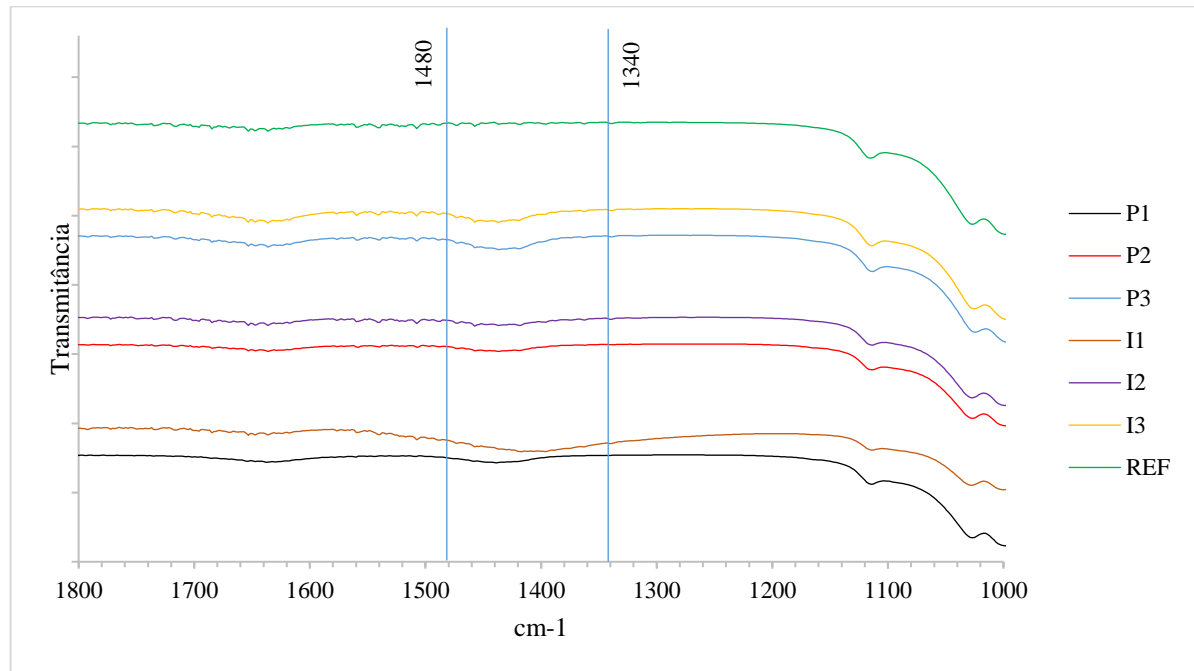
Figura 41 - Espectroscopia de infravermelho (FTIR) para os injetados



Para melhor visualização da banda indicativa da calcita, foi elaborado o gráfico da Figura 42, onde aparecem plotados os espectros dos três terços das amostras percoladas (P1, P2, P3), das amostras injetadas (I1, I2, I3) e da amostra branco (REF), em escala mais aproximada. Percebe-se a variação da banda da amostra I1 de 1340cm^{-1} até 1480cm^{-1} , enquanto que as demais amostras apresentam um intervalo mais estreito, variando de 1390cm^{-1} até 1480cm^{-1} . É nítida a diferença entre as amostras biocimentadas e a referência, que permanece reta no trecho delimitado.

A espectroscopia no infravermelho não fornece parâmetros para medir a eficiência da biocimentação em relação ao método adotado, seja percolação ou injeção. O gráfico de bandas permite identificar claramente a região correspondente à calcita e diferenciá-la em relação à amostra branco, mas não é possível dizer se um dos métodos adotados forneceu resultados melhores que o outro. O que se pode afirmar, analisando as Figuras 40 e 41, é que os picos mais intensos dos espectrogramas se devem aos constituintes naturais do solo, indicando que, embora tenha ocorrido precipitação de calcita, a quantidade não foi grande o bastante para modificar significativamente a composição das amostras, o que já havia sido observado a partir das análises DRX e FRX.

Figura 42 - Comparação dos espectros na região da calcita



4.2.5 Análise do experimento 2

O experimento 2 obteve sucesso no parâmetro básico que o experimento 1 não atingiu: a ocorrência da biocimentação. Praticamente todos os corpos de prova apresentaram indício de precipitação de calcita, tanto por medição de pH dos lixiviados quanto por observações visuais. Apenas um corpo de prova permaneceu com leituras de pH constantes e iguais a 4, indicando a presença de um meio ácido e agressivo aos microrganismos, o que impediria seu crescimento e, conseqüentemente, a formação do biocimento, hipótese posteriormente confirmada com o padrão de ruptura apresentado por essa amostra no ensaio de compressão simples.

A resistência à compressão apresentada pelas amostras biocimentadas não foi estatisticamente diferente das não biocimentadas, tendo em vista que a precipitação não ocorreu de maneira homogênea ao longo da profundidade dos corpos de prova, havendo maior concentração de calcita no terço superior e quantidades menores ou quase inexistentes nos terços médio e inferior, tanto para os percolados quanto para os injetados. Não havendo diferença na resistência à compressão entre as amostras biocimentadas e o solo natural, evidentemente também não houve diferença entre os resultados obtidos das amostras percoladas e injetadas.

A variação nos resultados do ensaio de compressão simples foi explicada pela heterogeneidade das amostras de solo que, mesmo todas sendo indeformadas e retiradas da mesma região, apresentaram discrepâncias em relação aos seus índices de vazios. Após

exumação, foi possível notar que algumas apresentavam grandes espaços vazios em seu interior, enquanto outras eram predominantemente maciças. Aos índices de vazios também foi atribuída a dificuldade de percolação/injeção das soluções nos corpos de prova, já que alguns não lixiviaram todo o líquido nem na primeira aplicação.

A diferença de precipitação de acordo com a profundidade que foi notada no ensaio de compressão simples ficou ainda mais evidente com os resultados das análises DRX e FRX. Os difratogramas provaram, por meio da intensidade dos picos, que o terço superior das amostras percoladas e injetadas apresentava mais biocimento do que os terços médio e inferior. A fluorescência comprovou essa teoria, apresentando uma quantidade de óxidos de cálcio superior nas camadas do topo em relação às camadas abaixo.

Porém, a difração e a fluorescência forneceram parâmetros importantes para comparação entre os métodos de percolação e injeção. Em ambas as análises, as amostras provenientes dos corpos de prova injetados apresentaram maior quantidade de carbonato de cálcio do que os percolados, conclusão que não pôde ser obtida através do ensaio de compressão simples e nem da espectroscopia. Em pequenas escalas, a injeção configura-se como um método mais eficiente do que a percolação, mas ainda assim a precipitação obtida é insuficiente para melhoria das propriedades do solo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

. Como são poucos os trabalhos que estudaram biocimentação em solos de matriz argilosa, e nenhuma referência encontrada que envolva amostras indeformadas, os resultados e conclusões aqui expostas servem para esclarecer alguns pontos importantes relacionados à biocimentação em solos argilosos residuais.

Inicialmente, foi realizado o experimento 1 com o objetivo de verificar a influência do índice de vazios e da umidade do solo na precipitação da calcita, a fim de decidir sobre utilização de amostras indeformadas ou moldadas em laboratório. Esperava-se que os maiores índices de vazios apresentassem melhores resultados de precipitação, o que não ocorreu. Os resultados obtidos não se mostraram relacionados com as variáveis testadas, e a quantidade de microrganismos encontrada nas amostras de solo natural provou-se insuficiente para a ocorrência de uma biocimentação satisfatória. A partir disso, optou-se por realizar o planejamento experimental com utilização de amostras indeformadas, com umidade e índice de vazios encontrados naturalmente em campo, e incluir a bioaugmentação para garantir a existência de uma quantidade adequada de microrganismos para sintetizar os nutrientes.

O experimento 2 apresentou resultados mais promissores. A partir da bioaugmentação, observou-se a formação de carbonato de cálcio em quase todas as amostras ensaiadas. Algumas precipitaram antes, outras demoraram mais, algumas tiveram maior quantidade visível de carbonato de cálcio precipitado do que outras. As análises a nível microscópico realizadas comprovaram a diferença de precipitação entre as três camadas dos corpos de prova, reforçando uma das maiores dificuldades encontradas na bibliografia, para vários tipos de solos, que é promover uma distribuição homogênea da calcita precipitada. Nenhum dos métodos utilizados promoveu conseguiu distribuir homogeneamente o carbonato de cálcio ao longo dos corpos de prova.

Os resultados de resistência à compressão simples demonstraram que a quantidade de carbonato de cálcio precipitado foi insuficiente para a melhora do comportamento mecânico das amostras. Portanto, considerando a metodologia de injeção e percolação aplicadas em amostras indeformadas de solo argiloso residual, a biocimentação provou-se ineficaz para aprimoramento das propriedades mecânicas desse tipo de material, diferentemente de resultados encontrados na bibliografia para solos arenosos.

Nesse sentido, o presente trabalho contribuiu para a compreensão do mecanismo de ocorrência da biocimentação em solos argilosos. Nesses materiais, a biocimentação apresenta uma série de limitações, sendo a heterogeneidade e coesão dos solos a principal e mais

significativa. A existência de coesão, que não ocorre em solos de grãos grossos onde a biocimentação é amplamente aplicada, promove a união entre as partículas e impede a penetração de fluídos entre elas. A calcita precipita apenas nos espaços encontrados nos vazios pré-existentes, tornando a técnica extremamente dependente da estrutura do solo.

Acredita-se que com a descoberta de meios que proporcionem uma precipitação mais homogênea, seja possível melhorar o comportamento mecânico desse tipo de solo. Para amostras indeformadas de solos argilosos residuais, mediante as conclusões obtidas, nem a percolação e nem a injeção são métodos eficientes de precipitação de calcita.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Se houver o interesse em continuar o estudo com amostras indeformadas, sugere-se a investigação da profundidade máxima que permita uma biocimentação eficiente, e posterior aplicação em campo. Nesses casos, a biocimentação não seria utilizada com o propósito de aumentar a resistência do solo em campo, mas talvez fosse uma boa técnica de impermeabilização de superfície ou prevenção de erosão superficial.

Para pesquisas com amostras moldadas em laboratório, sugere-se a substituição da água de compactação por solução composta por microrganismos e nutrientes, constituindo, nesse caso, uma única aplicação. Essa metodologia também propiciaria uma distribuição de substratos homogênea por toda a amostra, aumentando as chances de obtenção de uma precipitação uniforme.

Há, ainda, a alternativa de inserção da enzima urease isolada no solo. Essa técnica é recomendada para solos finos devido ao tamanho da enzima ser consideravelmente inferior ao tamanho do microrganismo sintetizador, sendo mais adequada para solos onde os espaços vazios são pequenos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABO-EL-ENEIN, S. A.; ALI, A. H.; TALKHAN, F. N.; ABDEL-GAWWAD, H. A. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. **Housing and Building National Research Center Journal**, v. 9, p. 36-40, 2013.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A. A review of microbial precipitation for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 1224-1235, 2015.
- ACHAL, V.; MUKHERJEE, A.; KUMARI, D.; ZHANG, Q. Biomineralization for sustainable construction – A review os processes and applications. **Earth-Science Reviews**, v. 148, p. 1-17, 2015.
- ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.
- ALMEIDA, J.; THOMÉ, A.; TONIAL, F.; SIQUEIRA, G. N. Isolamento e avaliação de bactérias do gênero Bacillus com potencial para uso em biocimentação na produção de argamassas. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Edição Especial XVII ENTAC, p. 1-12, 2019.
- AL QABANY, A.; SOGA, K.; SANTAMARINA, C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 8, p. 992-1001, 2012.
- ANBU, P.; HANG, C. H.; SHIN, Y. J.; SO, J. S. Formations of calcium carbonate minerals by bactéria and its multiple applications. **SpringerPlus**, v. 5, n. 250, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12770: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada**. Rio de Janeiro, 1992, 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545: Solo – eterminação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000, 12 p.
- BAO, X.; JIN, Z.; CUI, H.; CHEN, X.; XIE, X. Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 120, p. 273-291, 2019.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 6ª ed. São Paulo, SP: Saraiva, 2010. Disponível em: <https://www.academia.edu/35975801/Morettin_e_Bussab_Estat%C3%A1stica_B%C3%A1sica_6_ed>.
- CARDOSO, R.; PIRES, I.; DUARTE, S. O. D.; MONTEIRO, G. A. Effects of clay’s chemical interactions on biocementation. **Applied Clay Science**, v. 156, p. 96-103, 2018.

CECCHIN, Iziquiel. **Sorção e migração de biodiesel em um latossolo argiloso**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

CHENG, L.; SHAHIN, M. A.; CORD-RUWISCH, R.; ADDIS, M.; HARTANTO, T.; ELMS, C. Soil Stabilization by microbial-induced calcite precipitation (micp): Investigation into some physical and environmental aspects. Proceedings of 7th International Congress on Environmental Geotechnics, **7th International Congress on Environmental Geotechnics**, Melbourne: Australia, 2014, p. 1105-1112.

CHU J.; IVANOV, V.; HE, J. MAEIMI, M.; WU, S. Use of Biogeotechnologies for Soil Improvement. In: **Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering Methods**, 2015, p. 571-589.

DE MUYNCK, W.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 118-136, 2010.

DEJONG, J. T.; MORTENSEN, B. M.; MARTINEZ, B. C.; NELSON, D. C. Bio-mediated soil improvement. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 197-210, 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3^a ed. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA Solos, 2013. 353 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, Viçosa – MG, p. 515-524, 1999.

FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

GARBIN, Gregório Rigo. **Estudo de biocimentação em solo arenoso**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

GASPERI H.C., FERNANDES C.P., PHILIPPI P.C., RODRIGUES C.R. O. 2004. Determinação Computacional da Permeabilidade de Rochas Reservatório. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 3, Anais. 2002.

HOANG, T.; ALLEMAN, J.; CETIN, B.; IKUMA, K.; CHOI, S. G. Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP). **Canadian Geotechnical Journal**, v. 56, n. 6, p. 808-822, 2019.

IVANOV, V.; CHU, J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 7, n. 2, p. 139-153, 2008.

IVANOV, V.; CHU, J.; STABNIKOV, V. Basics of construction microbial biotechnology. In: **Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering**, 2015, p. 21-56.

IVANOV, V.; STABNIKOV, V. Basic concepts on biopolymers and biotechnological admixtures for eco-efficient construction materials. *In: Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*, 2016, p. 13-35.

JIANG, N. J.; SOGA, K.; DAWOUD, O. Experimental study of mitigation of soil internal erosion by microbially induced calcite precipitation. **Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability**, 2014, p. 1586-1595.

JIANG, N. J.; YOSHIOKA, H.; YAMAMOTO, K.; SOGA, K. Ureolytic activities of a urease-producing bacterium and purified urease enzyme in the anoxic condition: Implication for subseafloor sand production control by microbially induced carbonate precipitation (MICP). **Ecological Engineering**, v. 90, p. 96-104, 2016.

KAUR, R., GOYAL, D. Mineralogical comparison of coal fly ash with soil for use in agriculture. **J Mater Cycles Waste Manag**, v. 18, p. 186–200, 2016.

KEYKHA, H. A.; ASADI, A.; ZAREIAN, M. Environmental factors affecting the compressive strength of microbially induced calcite precipitation treated soil. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 10, p. 889-894, 2017.

KEYKHA, H. A.; HUAT, B. B. K.; ASADI, A. Electrokinetic Stabilization of Soft Soil Using Carbonate-Producing Bacteria. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 32, n. 4, p. 739-747, 2014.

KHALEGHI, M.; ROWSHANZAMIR, M. A. Biologic improvement of a Sandy soil using single and mixed cultures: A comparison study. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 112-119, 2019.

KIM, G.; KIM, J.; YOUN, H. Effect of Temperature, pH, and Reaction Duration on Microbially Induced Calcite Precipitation. **Applied Sciences**, v. 8, n. 1277, 2018.

KRAJEWSKA, B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 59-67, 2018.

LEE LEE, M.; NG, W. S.; TANAKA, Y. Stress-deformation and compressibility responses of bio-mediated residual soils. **Ecological Engineering**, v. 60, p. 142-149, 2013.

MAHAWISH, A.; BOUAZZA, A.; GATES, W. P. Improvement of Soft Soils Using Bio-Cemented Sand Columns. In: Wu W., Yu HS. Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, **Springer Series in Geomechanics and Geoengineering**, 2018, p. 822-825.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3^a ed. New Jersey - EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2005, 577 p.

MONTOYA, B. M., DEJONG, J. T.; BOULANGER, R. W. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation. **Géotechnique**, v. 63, n. 4, p. 302-312, 2013.

MORALES, L.; GARZÓN, E.; ROMERO, E.; SÁNCHEZ-SOTO, P. J. Microbiological induced carbonate (CaCO₃) precipitation using clay phyllites to replace chemical stabilizers (cement or lime). **Applied Clay Science**, v. 174, p. 15-28, 2019.

MOUNTASSIR, G. El.; MINTO, J. M.; VAN PAASSEN, L. A.; SALIFU, E.; LUNN, R. J. Applications of Microbial Processes in Geotechnical Engineering. **Advances in Applied Microbiology**, v. 104, p. 39-91, 2018.

MUJAH, D.; SHAHIN, M. A.; CHENG, L. State-of-the-art review of bio-cementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization. **Geomicrobiology Journal**, v. 34, n. 8, p. 524-537, 2017.

NAYAK, P. S.; SINGH, B. K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bulletin of Materials Science**, v. 30, n. 3, p. 235-238, 2007.

NG, W.S.; LEE, M. L.; KHUN, T. C.; LING, H. S. Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 4, p. 718-728, 2013.

NGUYEN, T. T.; JANIK, L. J.; RAUPACH, M. Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) spectroscopy in soil studies. **Australian Journal Soil Research**, v. 29, p. 49-67, 1991.

OLIVEIRA, Lucas Valério de. **Avaliação da técnica biocimentante em solo arenoso no controle de *piping* em sistemas de drenagem urbana**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

OMOREGIE, A. I.; KHOSHDELNEZAMIHA, G.; SENIAN, N.; ONG, D. E. L.; NISSOM, P. M. Experimental optimisation of various cultural conditions on urease activity for isolated *Sporosarcina pasteurii* strains and evaluation of their biocement potentials. **Ecological Engineering**, v. 109, p. 65-75, 2017.

PACHECO, Vinicius Luiz. **Avaliação da resistência de solo arenoso biocimentado**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

PORTER, H.; DHAMI, N. K.; MUKHERJEE, A. Sustainable road bases with microbial precipitation. In: Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2016, Las Vegas. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials**, v. 171, n. 3, 2018, p. 95-108.

PORTUGAL, C. R. M.; FONYO, C.; MACHADO, C. C.; MEGANCK, R.; JARVIS, T. Microbiologically Induced Calcite Precipitation biocementation, green alternative for roads e is this the breakthrough – A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 1-13, 2020.

REBATA-LANDA, Veronica. **Microbial activity in sediments: Effects on soil behavior**. 2007. Dissertation (Degree Doctor of Philosophy in the School of Civil & Environmental

Engineering) – School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 2007.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2ª ed. Viçosa, NEPUT, 1997. 367 p.

SALIFU, E.; MACLACHLAN, E.; IYER, K. R.; KNAPP, C. W.; TARANTINO, A. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of Sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation. **Engineering Geology**, v. 9, p. 96-105, 2016.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. *In: Geologia de Engenharia*. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 87-100.

SÁNCHEZ, M.; FARIA, P.; FERRARA, L.; HORSZCZARUK, E.; JONKERS, H. M.; KWIECIEN, A.; MOSA, J.; PELED, A.; PEREIRA, A. S.; SNOECK, D.; STEFANIDOU, M.; STRYSZEWSKA, T.; ZAJAC, B. External treatments for the preventive repair of existing constructions: A review. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 435-452, 2018.

SCAPIN, M. A. **Aplicação da difração e fluorescência de raios X (WDXRF): ensaios em argilominerais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SHARAKY, A. M.; MOHAMED, N. S.; ELMASHAD, M. E.; SHREDAH, N. M. Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of sandy soil. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 861–869, 2018.

SHARMA, A.; RAMKRISHNAN, R. Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strenght of fine grained soils. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 198-202, 2016.

SUN, X.; MIAO, L.; CHEN, R. Effects of Different Clay's Percentages on Improvement of Sand-Clay Mixtures with Microbially Induced Calcite Precipitation. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, n. 9, p. 810-818, 2019.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3ª ed., rev. e ampl. Porto Alegre, RS: Emater/RS – Ascar, 2018. 252 p.

SUN, X.; MIAO, L.; TONG, T.; WANG, C. Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation. **Acta Geotechnica**, v. 14, n. 3, p. 627-638, 2018.

TERZIS, D.; LALOUI, L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review. **Geomechanics for Energy and the Environment**, v. 19, 2019.

UMAR, M.; KASSIM, K. A.; CHIET, K. T. P. Biological process of soil improvement in civil engineering: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, p. 767-774, 2016.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; MARCHÃO, R. L.; ABADE, V. S.; FELIX, J. C.; GUIMARÃES, M. F. Predição de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ em solos desenvolvidos de basalto, através de espectroscopia VisNIR. In: **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo – O solo e suas múltiplas funções**. Anais, 2015.

WANG, Z.; ZHANG, N.; CAI, G.; JIN, Y.; DING, N.; SHEN, D. Review os ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP). **Marine Georesources & Geotechnology**, v. 35, n. 8, p. 1135-1146, 2017.

WHIFFIN, V. S.; VAN PAASSEN, L. A.; HARKES, M. P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. **Geomicrobiology Journal**, v. 24, n. 5, p. 417-423, 2007.

XIAO, P.; LIU, H.; XIAO, Y.; STUEDLEIN, A. W.; MATTHEW EVANS, T. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 107, p. 9-19, 2018.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br